



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PROCESSAMENTO DE IMAGENS APLICADO A ESCOAMENTO GRANULAR

RYAN LUIS RODRIGUES LOUZADA

Tucuruí - PA

2023



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PROCESSAMENTO DE IMAGENS APLICADO A ESCOAMENTO GRANULAR

RYAN LUIS RODRIGUES LOUZADA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título bacharel em Engenheiro Mecânico.

**Orientador:
Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita**

Tucuruí - PA

2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com
ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

L886p Louzada, Ryan Luis Rodrigues.
Processamento de imagem aplicado à material granular. / Ryan Luis
Rodrigues Louzada. — 2022.
101 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
Coorientador(a): Prof. Me. Athur Reis Lemos Fontana Trabalho de
Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de
Engenharia Mecânica, Tucuruí, 2022.

1. materiais granulares. 2. Análise de imagem . 3. Recobrimento. 4.
Processamento de imagem . I. Título.

CDD 005.3




**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

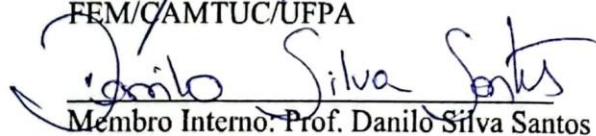
PROCESSAMENTO DE IMAGENS APLICADO A ESCOAMENTO GRANULAR

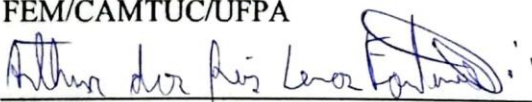
RYAN LUIS RODRIGUES LOUZADA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de
Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA


Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
FEM/CAMTUC/UFPA


Membro Interno: Prof. Danilo Silva Santos
FEM/CAMTUC/UFPA


Membro externo: Eng. Me. Arthur dos Reis Lemos Fontana
FluidPar/TECNOLAGO/UFPA

Conceito: EXCELENTE

Tucuruí, 24 de fevereiro de 2023.

Ao meu pai Edileno Luis e
minha mãe Rosineia.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que contribuíram para o meu sucesso na conclusão do meu curso de engenharia mecânica.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Edileno Luis e Rosineia Rodrigues, e ao meu irmão, pelo amor, apoio e incentivo incondicional que sempre me deram. Não seria possível chegar até aqui sem o apoio e a força que vocês me deram. Agradeço também às minhas avós, Catarina e Sebastiana, pelo amor e apoio que sempre me deram.

Agradeço ao meu orientador, o professor André Mesquita, por sua orientação valiosa, paciência e conhecimento compartilhado. Sua confiança em mim foi fundamental para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Também gostaria de agradecer à Vale pelo apoio financeiro.

Agradeço aos colegas e amigos do Laboratório Fluidpar, Hermeson Wanzeler, Athur Fontana, Maycon Castro, Evily, Alex e Danilo, pela parceria e pela amizade que construímos ao longo do curso.

Gostaria de agradecer aos amigos de infância silvio Antônio, Pedro Lucas, Pedro Henrique, Paulo Henrique, Dhonison, Thayson, José Mauricio e Altmir por estarem sempre presentes em minha vida.

Aos amigos que tucurui me apresentou, Carlos Vinicius, Junior, Carla, Raissa, Gabriela, Jonatas e Filipe, agradeço pela amizade sincera e pelo apoio em momentos difíceis.

Aos professores do curso de engenharia mecânica do campus de Tucuruí, aos funcionários da limpeza, vigilantes e funcionários administrativos, agradeço pela dedicação em nos proporcionar um ambiente acadêmico de qualidade.

Gostaria de agradecer à minha Tia Alba por todos os anos que morei em sua casa, assim como a todos seus filhos e familiares, que sempre me acolheram com carinho.

Aos meus tios e tias maternos e paternos, aos meus primos, agradeço pelo carinho, consideração e afeto que sempre demonstraram. Em especial a minha tia Arcagela e ao meu tio Raimundo filho.

Por fim, gostaria de homenagear duas pessoas especiais que já partiram, mas que sempre estarão em minha memória: minha amiga Dayana e meu avô Antinio Louzada. Gostaria que estivessem presentes nesse dia tão importante para mim.

PROCESSAMENTO DE IMAGENS APLICADO A ESCOAMENTO GRANULAR

RESUMO

Este trabalho descreve a criação de dois algoritmos desenvolvidos no Matlab para serem utilizados em pesquisas no laboratório Fluidpar. O primeiro algoritmo é uma ferramenta automática para determinar o ângulo de repouso de materiais granulares, enquanto o segundo é um método computacional para analisar e quantificar o recobrimento de partículas, a fim de avaliar o recobrimento de materiais granulares. A determinação do ângulo de repouso é um parâmetro importante na caracterização de materiais granulares, e o método proposto neste trabalho automatiza esse processo, tornando-o mais eficiente e preciso. O segundo algoritmo é capaz de avaliar a uniformidade do recobrimento de partículas, que é um aspecto crítico em muitas aplicações industriais de materiais granulares, permitindo uma avaliação mais detalhada e quantitativa desse processo. Ambos os algoritmos apresentaram resultados promissores e têm potencial para serem aplicados em estudos futuros no campo de materiais granulares.

Palavras-chave: Materiais granulares, processamento de imagens, recobrimento de partículas, pelotas de minério de ferro

IMAGE PROCESSING APPLIED TO GRANULAR FLOW

ABSTRACT

This work describes the creation of two algorithms that took place in Matlab to be used in research in the Fluidpar laboratory. The first algorithm is an automatic tool to determine the restriction angle of granular materials, while the second is a computational method to analyze and quantify particle coating in order to evaluate the coating of granular materials. The orientation of the restriction angle is an important parameter in the characterization of granular materials, and the method proposed in this work automates this process, making it more efficient and accurate. The second algorithm is able to evaluate the uniformity of particle coating, which is a critical aspect in many industrial applications of granular materials, allowing a more detailed and quantitative evaluation of this process. Both algorithms showed promising results and have the potential to be applied in future studies in the field of granular materials.

Keyword: Granular materials, image processing, particle coating, iron ore pellets.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Fluxo grama etapas do processamento de imagem.	23
Figura 2. amostra de pixels de uma imagem com grade de valores digitais, variando de 0 a 255 níveis de cinza.	24
Figura 3. RGB -processo de formação de cores.	26
Figura 4. Cubo RGB - os diferentes tons de cinza localizam-se ao longo da diagonal tracejada.	27
Figura 5. Exemplo de imagens binarizadas.	28
Figura 6. Bancada do ângulo de repouso, vista frontal(A); bandeja giratória, vista superior(B).	32
Figura 7. Esquema dos ensaios.	32
Figura 8. Medição da altura de material dentro do cilindro.	33
Figura 9. Esquemas das medições dos ângulos para a direção oeste e leste da pilha.	33
Figura 10. Coque de petróleo (A), cravão PCI (B), pelotas(C) e minério granulado(D).	34
Figura 11. imagem normal.	35
Figura 12. Imagem binarizada.	35
Figura 13. Imagem com comando imfill (A); Imagem com o comando imopen (B).	36
Figura 14. Imagem com comando imclose (A); Imagem com o comando edge (B).	36
Figura 15. Imagem com comando imclose (A); Imagem com o comando edge (B).	37
Figura 16. Ângulo para o lado direito.	37
Figura 17. Ângulo para o lado esquerdo.	38
Figura 18. Ângulo para com AutoCAD.	38
Figura 19. Bancada de suspensão de partícula.	39
Figura 20. Molde para análise de imagem.	40
Figura 21. Tinta usada.	41
Figura 22. (A) pelotas sem recobrimento de pigmentação;(B)pelotas com recobrimento de pigmentação.	41
Figura 23. Objeto de estudo(A); quadrado de referência(B).	42
Figura 24. <i>color thresholder</i> opção RGB.	43
Figura 25. <i>color thresholder</i> opção RGB com limites definidos.	43
Figura 26. <i>Imagem binarizada</i>	44
Figura 27. Resposta do matlab aos comandos.	45
Figura 28. Resultado final do programa.	47

Figura 29. Media dos ângulos obtidos pelo MATLAB coque de petróleo.....	50
Figura 30. Media dos ângulos obtidos pelo MATLAB para carvão PCI.	53
Figura 31. Media dos ângulos obtidos pelo MATLAB para pelota.	55
Figura 32. Media dos ângulos obtidos pelo MATLAB para minério granulado.....	58
Figura 33. Ensaio com 20 gotas.....	59
Figura 34. Ensaio com 50 gotas.....	60
Figura 35. Ensaio com 100 gotas.....	60
Figura 36. Área da esfera ensaio com 20 gotas.	60
Figura 37. Área da esfera ensaio com 50 gotas.	61
Figura 38. Área da esfera ensaio com 100 gotas.	61
Figura 39. Área do recobrimento ensaio com 20 gotas.	61
Figura 40. Área do recobrimento ensaio com 50 gotas.	61
Figura 41. Área do recobrimento ensaio com 100 gotas.	62
Figura 42. (A) vista frontal; (B) vista posterior.....	62
Figura 43. (A) vista frontal binarizada; (B) Resultado vista frontal.....	63
Figura 44. Resultados numéricos apresentados pelo programa para vista frontal.....	64
Figura 45. (A) vista posterior binarizada; (B) Resultado vista posterior.....	65
Figura 46. Resultados numéricos apresentados pelo programa para vista posterior.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultado objeto de estudo e de referência.....	46
Tabela 2. Umidades utilizadas.....	48
Tabela 3. Ângulos de repouso para coque de petróleo na umidade de ,5%, 3,2%, 4,7% 6,2% e 8,0%.....	49
Tabela 4. Media dos resultados e R ² para coque petróleo	50
Tabela 5. Ângulos para a umidade de 5,0%, 6,2%, 7,4%, 8,6% e 10,0% carvão PCI.	51
Tabela 6. Media dos resultados e R ² para carvão PCI.....	52
Tabela 7. Ângulos para a umidade de 1,5%, 2,5%, 3,5%, 4,5% e 5,5% para pelotas	53
Tabela 8. Media dos resultados e R ² para pelota	55
Tabela 9. Ângulos para a umidade de 1,8%, 3,2% e 4,6%, 6,0% e 7,3% para minério granulado.	55
Tabela 10. Media dos resultados e R ² para minério granulado.	57
Tabela 11. Media dos resultados e R ² para minério granulado.	59
Tabela 12. Resultados para vista frontal.....	64
Tabela 13. Resultados para vista posterior	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

JKR - Johnson-Kendall-Roberts

RKN - Kuhlmann-Neuhaus

RGB - *Red*(vermelho), *green*(Verde) e *blue*(azul)

MAI – Moldura para análise de imagem.

JPEG - *Joint Photographic Experts Group* (Grupo Conjunto de Especialistas em Fotografia)

PNG - *Portable Network Graphics* (Gráficos Portáteis de Rede)

GIF - *Graphics Interchange Format* (Formato de intercâmbio de gráficos)

BMP - Bitmap

TIFF - *Tagged Image File Format* (Formato de arquivo de imagem marcado)

SVG - *Scalable Vector Graphics* (Gráficos vetoriais escalonáveis)

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ - Densidade do material.

m - Massa.

V - Volume.

ε - Porosidade.

Vv - Volume de vazios do material.

Vt - Volume total.

δ - Deformação elástica da partícula.

F - Força normal de contato.

R - Raio da partícula.

E - Módulo de elasticidade efetivo.

w - Energia elástica de deformação da partícula e da superfície.

μ - Coeficiente de atrito estático.

Ff - Força necessária para mover o material.

Fn - Força perpendicular à superfície de contato.

m_0 - Coeficiente angular da reta.

b - Coeficiente linear.

y - variável dependente.

x - variável independente.

Σ - Somatório.

n - Número de observações.

R - Coeficiente de com primaria vermelha.

G - Coeficiente de com primaria verde.

B - Coeficiente de cor primaria azul.

r - coeficiente de mistura vermelho.

g - Coeficiente de mistura verde.

b - coeficiente de mistura azul.

A - área.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO	16
1.1.1 Objetivo geral.	16
1.1.2 Objetivo específicos	16
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	17
2.1 MATERIAIS GRANULARES.	17
2.1.1 Propriedades físicas.	17
2.1.2 Escoabilidade	19
2.1.3 Fluidização	20
2.1.4 Recobrimento de partícula.	21
2.2 Fundamentos do processamento de imagem.	22
2.2.1 Principais tipos de imagem.	24
2.2.1.1 <i>Imagens em tons de cinza</i>	24
2.2.1.2 <i>Imagens RGB</i>	25
2.2.1.3 <i>Imagens binarizadas.</i>	27
2.2.2 Principais formatos de imagens	28
2.3 MATLAB.	29
2.4 METODO DOS MINIMOS QUADRADOS	30
3. APARATOS EXPERIMENTAIS E TECNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM.	31
3.1 MEDIÇÃO DO ÂNGULO DE REPOUSO.	31
3.1.1 Descrição Dos Aparatos	31
3.1.2 Material Das Amostras	33
3.2 ALGORITMO PARA PROCESSAR ÂNGULO DE REPOUSO.	34
3.3 MEDIÇÃO DE ÁREA DE RECOBRIMENTO.	39
3.3.1 Descrição dos aparatos.	39

3.3.1.1 <i>Recobrimento de esfera fluidizada.</i>	39
3.3.1.2 <i>Recobrimento de pelota.</i>	39
3.3.2 Material das amostras	40
3.3.2.1 <i>Recobrimento de esfera fluidizada.</i>	40
3.3.2.2 <i>Recobrimento de pelota.</i>	41
3.4 ALGORITMO E FUNCIONAMENTO PARA ANALISE DE ÁREA DE RECOBRIMENTO.....	42
4. RESULTADOS	48
4.1 MEDIÇÃO DO ÂNGULO DE REPOUSO.	48
4.1.1 Coque de petróleo	48
4.1.2 Carvão PCI	50
4.1.3 Pelota.	53
4.1.4 Minério granulado	55
4.2 RECOBRIMENTO DE ESFERA FLUIDZADA.	58
4.3 RECOBRIMENTO DE PELOTAS	62
5. CONCLUSÃO	67
Referências	68

1. INTRODUÇÃO

A análise de materiais granulares tem sido objeto de estudo de diversas áreas do conhecimento, uma vez que esses materiais são amplamente utilizados em construções civis, na indústria de alimentos e em diversas outras áreas. A caracterização desses materiais é fundamental para garantir sua qualidade e desempenho.

Nesse contexto, a análise de imagem tem se mostrado uma ferramenta promissora para a análise de materiais granulares. Através da análise de imagens digitais, é possível obter informações precisas sobre as propriedades desses materiais, como o ângulo de repouso e o recobrimento, por exemplo.

O ângulo de repouso é um parâmetro importante para a caracterização de materiais granulares, pois indica a estabilidade desses materiais quando em repouso. Já o recobrimento é uma medida que indica a distribuição dos materiais granulares em uma superfície, sendo importante para avaliar a qualidade de revestimentos, como em estradas e calçadas.

Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver um método de análise de imagem para a determinação do ângulo de repouso e do recobrimento de materiais granulares. Para isso, serão utilizadas técnicas de processamento de imagens, análise estatística e aprendizado de máquina. A validação do método será realizada através de comparações com resultados obtidos por métodos tradicionais de análise.

Espera-se que este trabalho contribua para o desenvolvimento de novas técnicas para a caracterização de materiais granulares, tornando mais eficiente e precisa a análise desses materiais. Além disso, a aplicação da análise de imagem pode reduzir custos e tempo de análise, tornando-se uma alternativa viável para a caracterização desses materiais.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para aquisição de imagens 2D para se avaliar de forma digital o recobrimento e o ângulo de repouso.

1.1.2 Objetivo específicos

- Desenvolver um algoritmo em *Matlab* capaz de avaliar o ângulo de repouso de materiais granulares;

- Desenvolver uma metodologia que permita a aquisição de imagens de recobrimento de pelota;
- Desenvolver um algoritmo em matlab capaz de avaliar o recobrimento de partículas e pelotas.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 MATERIAIS GRANULARES.

2.1.1 Propriedades físicas.

Os materiais granulares são amplamente encontrados na natureza, como areia, rochas e solos, e são comumente usados em diversas áreas da indústria, como na mineração, agricultura e construção civil. Eles são caracterizados por possuírem partículas sólidas maiores que as moléculas, formando um agregado poroso (OLIVEIRA, 2015). Entre as propriedades físicas mais relevantes desses materiais, podemos destacar a densidade, porosidade, ângulo de repouso, coesão e fricção. A densidade é definida como a relação entre a massa do material e seu volume, e pode ser calculada pela Equação 1:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

sendo ρ é a densidade do material, m é sua massa e V é seu volume. Já a porosidade é a relação entre o volume de vazios do material e seu volume total, e pode ser calculada pela Equação 2:

$$\varepsilon = \frac{Vv}{Vt} \quad (2)$$

onde ε é a porosidade, Vv é o volume de vazios do material e V é seu volume total.

O ângulo de repouso é a inclinação máxima que um pilha de material granular pode ter sem se deslocar. Esse ângulo pode ser medido experimentalmente e varia dependendo das propriedades do material granular, como a forma e o tamanho das partículas. Entre as propriedades, a adesão é um dos importantes fatores influenciam no ângulo de repouso. Adesão para materiais particulados é o fenômeno pelo qual partículas se aderem a uma superfície, seja essa superfície outra partícula ou um material sólido. A adesão de partículas pode ocorrer em diversas situações, como em sistemas de tubulação, em processos de fabricação ou em dispositivos eletrônicos (KNIGHT, 1993).

A adesão entre partículas e superfícies é influenciada por diversos fatores, como a energia superficial das partículas e da superfície, a geometria das partículas e da superfície, a

umidade e a temperatura. A compreensão da adesão de partículas é importante em muitos campos, incluindo a indústria química, de alimentos e de materiais, onde a formação de depósitos e obstruções em sistemas de tubulação pode afetar o desempenho e a eficiência do processo. (ISRAELACHVILI, 2011).

Para entender a adesão de partículas, diversos modelos teóricos foram desenvolvidos, como o modelo de adesão de Johnson-Kendall-Roberts (JKR) e o modelo de adesão de Rumpf-Kuhlmann-Neuhaus (RKN). O modelo JKR é amplamente utilizado na área de ciência de superfícies e interfaces para entender e prever a adesão entre partículas e superfícies, levando em consideração a deformação elástica da partícula e da superfície. Já o modelo RKN é um modelo semi-empírico usado para descrever a adesão de partículas em superfícies, considerando fatores como a energia superficial e a geometria das partículas e das superfícies.

Compreender a adesão de partículas é fundamental para melhorar o desempenho e a eficiência de sistemas e processos industriais, além de garantir a qualidade de produtos finais. Além disso, a adesão de partículas também pode ter implicações na saúde e no meio ambiente, como em casos de poluição do ar ou de contaminação de alimentos. A equação de Hertz (Eq. 3) é usada para relacionar a deformação elástica da partícula com a força normal de contato, enquanto a equação JKR (Eq. 4) é usada para relacionar a energia elástica de deformação com a força de adesão.

$$\delta = \left(\frac{3F}{4RE}\right)^{1/3} \quad (3)$$

$$w = \frac{3}{4}R^3\sqrt{\frac{F}{\pi E}} \quad (4)$$

Onde δ é a deformação elástica da partícula, F é a força normal de contato, R é o raio da partícula, E é o módulo de elasticidade efetivo, e w é a energia elástica de deformação da partícula e da superfície.

A fricção é a resistência ao movimento do material granular sobre uma superfície, e é expressa como a força necessária para mover o material dividida pela força perpendicular à superfície de contato, de acordo com a Equação 4:

$$\mu = \frac{Ff}{Fn} \quad (5)$$

onde μ é o coeficiente de atrito estático, Ff é a força necessária para mover o material e Fn é a força perpendicular à superfície de contato. É importante notar que a fricção entre as partículas de um material granular é uma propriedade complexa que depende de muitos fatores, como o

tamanho e a forma das partículas, a rugosidade da superfície de contato e a umidade do material (SILVA, 2013).

Além dessas propriedades, outros fatores que influenciam o comportamento dos materiais granulares incluem sua viscosidade, elasticidade, plasticidade e deformabilidade. A viscosidade pode ser definida como a resistência à deformação do material, enquanto a elasticidade é a capacidade do material de se deformar e recuperar sua forma original. A plasticidade é a capacidade do material de se deformar permanentemente sem quebrar, enquanto a deformabilidade é a facilidade com que o material se deforma quando submetido a uma força (JAEGER, 2007).

A compreensão dessas propriedades é essencial para o projeto e operação de equipamentos de processamento. Na indústria da mineração, o conhecimento das propriedades dos materiais granulares é particularmente importante, já que as operações de extração e processamento de minérios envolvem o manuseio de grandes quantidades de material granular, incluindo rochas, minérios e outros resíduos sólidos. A escolha do equipamento e dos métodos de processamento mais adequados depende de várias propriedades dos materiais granulares, como sua densidade, granulometria e propriedades mecânicas (KUHN *et al* 2017).

2.1.2 Escoabilidade

A escoabilidade, ou fluidez, dos materiais granulares é uma propriedade física importante que afeta a manipulação e processamento desses materiais em diversas aplicações industriais, como transporte, armazenamento, mistura e fluidização. Essa propriedade se refere à facilidade com que as partículas se movem umas sobre as outras e podem ser protegidas por vários fatores, como o tamanho e formato das partículas, a presença de umidade, a densidade e a pressão do material, entre outros (JENIKE, 1964).

A fluidez dos materiais granulares é frequentemente frequente por meio do ângulo de repouso, que é o ângulo formado pela superfície de um monte de partículas granulares em repouso com a horizontal. Quanto menor o ângulo inclinação, mais fluido é o material. Por outro lado, quando o ângulo de descanso é alto, o material pode apresentar problemas de fluxo, como bloqueio do escoamento, formação de arcos e pontes, segregação e compactação (HUMPHREY, 2002).

Além do ângulo de triângulo, outras medidas podem ser utilizadas para caracterizar a escoabilidade dos materiais granulares, como a fluidez de descarga, que é a taxa de fluxo de material através de um orifício sob uma determinada pressão, e a densidade aparente de

enchimento, que é a densidade aparente do material no interior de um recipiente após ser preenchido (CARRASCO *et al.*, 2012).

A caracterização da escoabilidade dos materiais granulares é importante para o desenvolvimento de projetos de transporte e processamento desses materiais, incluindo o dimensionamento de silos, alimentadores, transportadores e misturadores (SILVA *et al.*, 2014). Além disso, essa propriedade pode ser utilizada como um indicador de qualidade dos materiais granulares, especialmente na indústria alimentícia e farmacêutica, onde a escoabilidade pode afetar a dosagem e a qualidade do produto final (BENNETT *et al.*, 2002).

Em resumo, a escoabilidade é uma propriedade fundamental dos materiais granulares, que pode ser experimentada por vários fatores e que tem uma grande importância na sua manipulação e processamento em diferentes aplicações industriais. A caracterização dessa propriedade é essencial para o desenvolvimento de projetos e para garantir a qualidade dos produtos.

2.1.3 Fluidização

A fluidização é um fenômeno caracterizado pela transição de um material particulado de um estado sólido para um estado fluido. Isso ocorre quando um fluxo de fluido é injetado através do leito de partículas, o que gera uma pressão hidrostática que equilibra o peso das partículas. Quando a pressão hidrostática se iguala ao peso das partículas, elas começam a se mover e se comportam como um fluido (DAVIS *et al.*, 2009).

A fluidização é amplamente utilizada na indústria química, petroquímica e de processamento de alimentos, e é uma técnica eficaz para a mistura de sólidos, secagem, extração e reações químicas. A fluidização pode ser classificada em dois tipos principais: fluidização convencional e fluidização de alta taxa. Na fluidização convencional, as partículas se comportam como um leito fluidizado e se movem em forma de bolhas, enquanto que na fluidização de alta taxa, as partículas são transportadas pelo fluido em suspensão e se movem em forma de jato (YANG *et al.*, 2018).

Algumas das principais propriedades físicas das partículas que afetam a fluidização incluem a densidade, tamanho e forma das partículas, bem como a porosidade e distribuição do tamanho de poros do leito. A densidade das partículas influencia a pressão hidrostática necessária para fluidizar o leito, enquanto o tamanho e a forma das partículas afetam a distribuição de vazios e o arranjo das partículas no leito (SMITH *et al.*, 2015). A porosidade do leito influencia o fluxo de fluido através do leito e a transferência de calor e massa, enquanto a

distribuição do tamanho de poros do leito afeta a distribuição de partículas no leito e a eficiência da separação de partículas (DAVIS *et al.*, 2009).

A fluidização também é influenciada pela velocidade do fluido que é injetado através do leito. Quando a velocidade do fluido é baixa, as partículas se movem em forma de bolhas e o leito apresenta uma distribuição uniforme de partículas. Quando a velocidade do fluido é aumentada, as bolhas se tornam mais instáveis e se fundem, formando canais porosos através do leito. Quando a velocidade do fluido atinge um ponto crítico, as partículas começam a se mover em forma de jato e o leito se torna menos denso e mais fluido (YANG *et al.*, 2018).

Em resumo, a fluidização é um fenômeno importante para a indústria, permitindo uma ampla gama de aplicações em diferentes áreas. As propriedades físicas das partículas, juntamente com a velocidade do fluido, influenciam o comportamento da fluidização, o que pode ser aproveitado para otimizar processos industriais.

2.1.4 Recobrimento de partícula.

recobrimento de partículas é um processo amplamente utilizado em diversas áreas, incluindo farmacêutica, cosmética, alimentos e materiais de construção. Segundo Vipagunta *et al.* (2008), o processo de recobrimento consiste na aplicação de uma camada fina de material em torno de uma ou mais partículas com o objetivo de modificar ou melhorar suas propriedades físicas e químicas.

O recobrimento de partículas pode ser realizado utilizando uma variedade de técnicas, como precipitação química, deposição eletrostática, atomização, entre outras. A escolha do método de recobrimento depende das características das partículas e da camada de revestimento desejada (Yan *et al.*, 2014).

A precipitação química é uma técnica comum de recobrimento de partículas, que envolve a mistura de um agente de recobrimento com a solução de partículas, seguida de agitação para formar um revestimento uniforme na superfície das partículas. Na deposição eletrostática, as partículas são carregadas eletricamente e a camada de revestimento é depositada por atração eletrostática. A atomização, por sua vez, é uma técnica em que a solução de recobrimento é atomizada em pequenas gotículas, que são então pulverizadas sobre as partículas a serem revestidas (Müller *et al.*, 2002).

O recobrimento de partículas pode trazer uma série de benefícios, incluindo a melhoria da estabilidade das partículas, a proteção contra a degradação e a melhoria da biodisponibilidade (Ji *et al.*, 2014). O recobrimento também pode ser usado para controlar a liberação de fármacos, melhorar a aparência das partículas e criar materiais compostos com

propriedades únicas, como partículas magnéticas revestidas, que podem ser usadas para a separação de componentes em misturas complexas (Wang *et al.*, 2014).

Na indústria farmacêutica, o recobrimento de partículas é amplamente utilizado para melhorar a estabilidade e a biodisponibilidade dos fármacos. O recobrimento pode ser usado para proteger os fármacos da luz, umidade e oxidação, além de permitir a liberação controlada do fármaco no trato gastrointestinal (Vippagunta *et al.*, 2008). Na indústria de alimentos, o recobrimento de partículas pode ser usado para melhorar a textura, sabor e aparência dos alimentos, bem como para proteger os ingredientes ativos contra a degradação durante o processamento e armazenamento (Chen *et al.*, 2019).

2.2 FUNDAMENTOS DO PROCESSAMENTO DE IMAGEM

O processamento de imagens digitais é uma área da ciência da computação que lida com a análise e manipulação de imagens digitais. As imagens digitais são representadas por um conjunto de valores numéricos que representam a intensidade de luz em cada ponto da imagem. De acordo com Jain *et al.* (1995), o processamento de imagens digitais tem uma ampla gama de aplicações em diversas áreas, incluindo medicina, biologia, engenharia, entre outras.

O processamento de imagem é uma técnica que envolve a manipulação de uma imagem digital para melhorar sua qualidade e extrair informações úteis dela. Segundo Gonzalez e Woods (2008), as etapas do processamento de imagem podem variar dependendo da aplicação específica, mas geralmente envolvem aquisição da imagem, pré-processamento, segmentação, extração de características, classificação e pós-processamento.

A aquisição da imagem é uma etapa importante do processamento de imagem e envolve a captura da imagem por meio de um dispositivo de captura, como uma câmera digital, scanner ou ressonância magnética. Segundo Jain (1995), a qualidade da imagem adquirida é fundamental para o sucesso do processamento de imagem e é importante garantir que a imagem contenha informações suficientes para a aplicação específica.

O pré-processamento é uma etapa crítica do processamento de imagem, pois remove ruídos e outras irregularidades que possam afetar a qualidade da imagem. De acordo com Suri *et al.* (2004), o pré-processamento pode envolver a aplicação de filtros para remover ruído, a correção de distorções na imagem e a normalização da intensidade da imagem.

A segmentação é uma etapa importante do processamento de imagem, que envolve a divisão da imagem em diferentes regiões com base em características específicas. Conforme destacado por Haralick e Shapiro (1992), a segmentação pode envolver a aplicação de técnicas

de limiarização, segmentação por crescimento de região ou segmentação por detecção de bordas.

A extração de características é uma etapa crítica do processamento de imagem, pois envolve a identificação de características relevantes da imagem, como bordas, linhas, formas ou texturas. De acordo com Gonzalez e Woods (2008), a extração de características pode envolver a aplicação de técnicas de detecção de bordas, extração de pontos de interesse ou outros métodos de análise de imagem.

A classificação é uma etapa importante do processamento de imagem, que envolve a utilização das características extraídas para classificar a imagem ou regiões da imagem em diferentes categorias. Conforme ressaltado por Li *et al.* (2018), a classificação pode ser útil para identificar objetos específicos na imagem ou para detectar padrões de interesse.

O pós-processamento é a etapa final do processamento de imagem e envolve a aplicação de técnicas para melhorar a qualidade da imagem ou torná-la mais adequada para uma aplicação específica. De acordo com Suri *et al.* (2004), o pós-processamento pode envolver a aplicação de filtros de realce, a correção de distorções na imagem e a melhoria na resolução da imagem. Podemos melhor visualizar isso no fluxo grama a seguir na Figura 1.

Figura 1. Fluxo grama etapas do processamento de imagem.



Fonte: Autoria própria (2023).

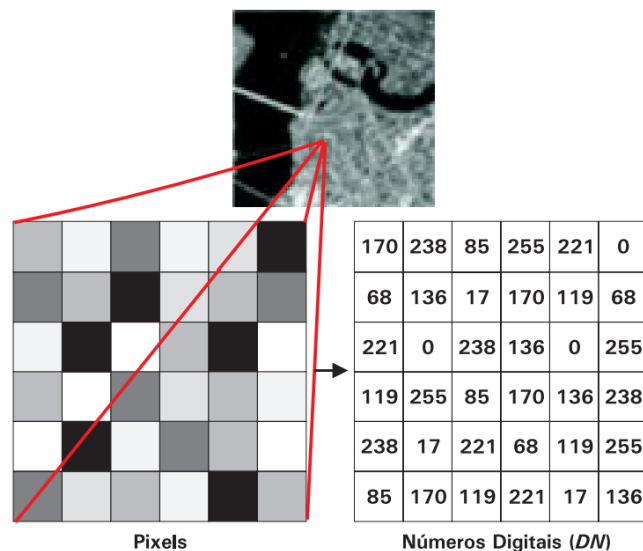
2.2.1 Principais tipos de imagem

De acordo com Gozalez e woods(2009) pode-se definir uma imagem como uma função bidimensional, $f(x,y)$, onde x e y são coordenadas espaciais(planos) e a amplitude de f em qualquer coordenada de x e y é denominado de intensidade de luz ou níveis de cinza. Quando x,y e f são valores finitos e discreto denomina-se como Imagem digita. Desta forma, pode-se compreender uma imagem digital como uma matriz de linhas por colunas, respectivamente x e y , usualmente numeradas de (1,1) começando no canto superior esquerdo ao lado inferior direito de uma malha reticulada ou grade (schowengerdt,2006). Cada elemento dessa malha é denominado de pixel.

2.2.1.1 Imagens em tons de cinza

Segunda Schowengerdt (2006) imagens em tons de cinza, cada elemento da malha da imagem possui um valor digital. Esse valor digital se refere a intensidade da luz, ou em melhor termos, intensidade média da energia eletromagnética refletida ou absorvida por diferentes alvos na superfície imageada. Essa média da energia eletromagnética capturada pelos sensores (câmera, câmera de vídeo, etc.) e transformada para uma escala de 256 níveis de cinza (0 a 255) indo da cor preta a cor branca. respetivamente Figura 1.

Figura 2. amostra de pixels de uma imagem com grade de valores digitais, variando de 0 a 255 níveis de cinza.



Fonte: Chowengerdt (2006)

De acordo com Gonzalez e Woods (2008) as imagens em tons de cinza são frequentemente usadas em aplicações de processamento de imagem, pois apresentam uma boa relação entre qualidade de imagem e tamanho do arquivo. Além disso, as imagens em tons de cinza podem ser processadas de forma mais eficiente do que as imagens coloridas, pois contêm menos informações.

As imagens em tons de cinza também são frequentemente usadas em aplicações de visão computacional, como detecção de bordas e reconhecimento de objetos. De acordo com Szeliski (2010), a detecção de bordas é uma técnica comum de processamento de imagem que envolve a identificação de transições abruptas na intensidade da imagem. Isso pode ser realizado de maneira eficiente em imagens em tons de cinza, onde a intensidade é representada por um valor único de escala de cinza.

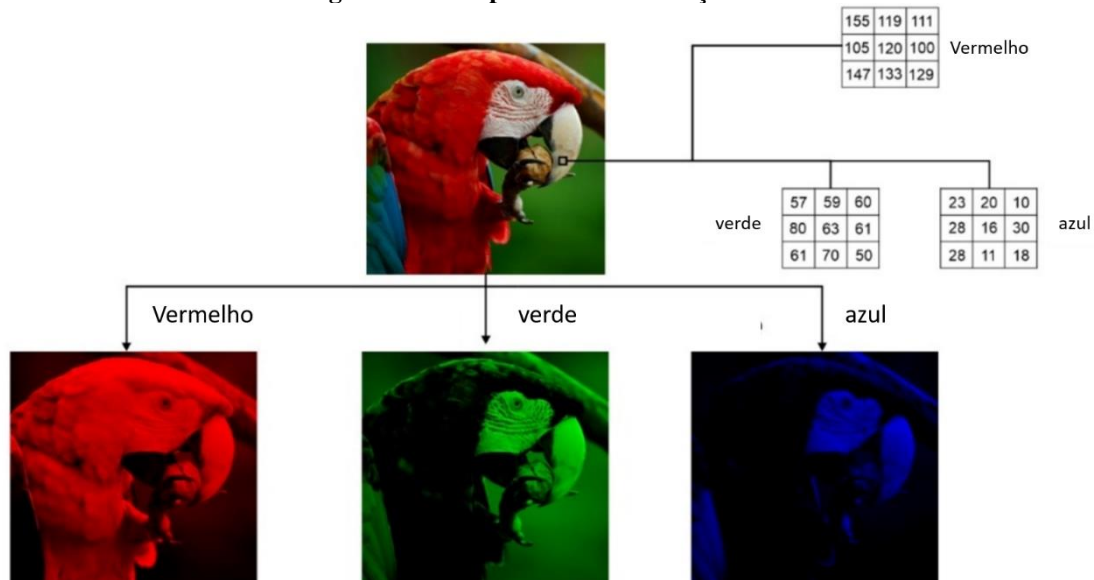
2.2.1.2 *Imagens RGB*

Segundo Gonzalez e Woods (2008), o sistema RGB é o modelo de cores mais comum em imagens digitais, devido à sua ampla compatibilidade com dispositivos de exibição e câmeras digitais. Além disso, as imagens RGB são amplamente usadas em aplicações de visão computacional, processamento de imagens de satélite e análise de imagens médicas.

O processamento de imagens RGB é uma técnica poderosa para analisar as informações de cor em uma imagem e extrair informações úteis dela. De acordo com Guo *et al.* (2019), o processamento de imagens RGB é amplamente utilizado em áreas como análise de texturas, detecção de objetos e reconhecimento de padrões. Por exemplo, o reconhecimento de objetos é frequentemente realizado por meio da comparação de características de cor nas imagens RGB, como a cor de fundo e as cores dos objetos, conforme destacado por Zhang *et al.* (2018).

O sistema RGB é usado não apenas em imagens digitais, mas também em outras aplicações, como na produção de cores em displays, TVs e monitores de computador. Segundo Naci *et al.* (2017), o sistema RGB é amplamente utilizado na indústria da televisão e do cinema, onde as cores são produzidas por meio da mistura de luz vermelha, verde e azul. Esse sistema é particularmente útil na produção de cores vibrantes e vivas, o que é essencial para uma experiência de visualização de alta qualidade. Apresenta uma imagem gerada por esse sistema na Figura 3 e como funciona o processo de formação de cores dele.

Figura 3. RGB -processo de formação de cores.



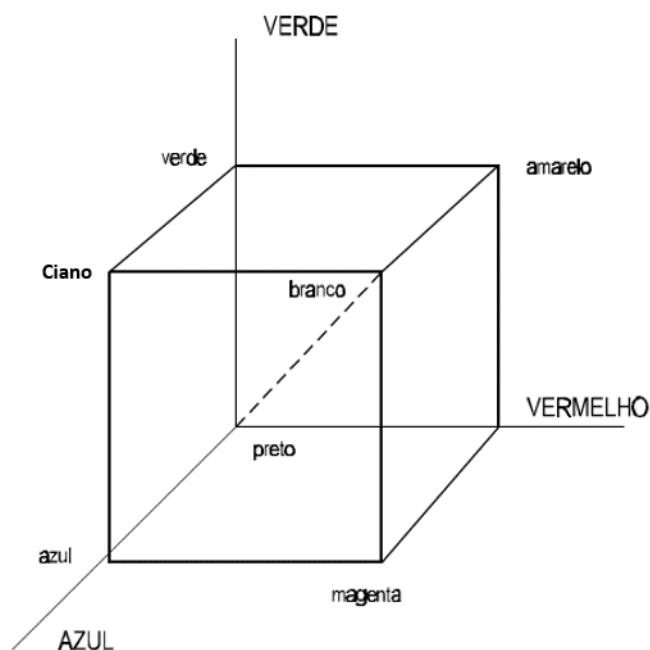
Fonte: autoria própria (2023).

Com a utilização das cores primárias ou secundárias pode-se obter todas as tonalidades de cores. Um exemplo disso são os monitores televisivos, que utilizam de cores primárias. Utilizando desses princípios de cores primárias pode-se representar qualquer cor quantitativamente com um grupo de três números ou coeficientes. Os três coeficientes podem ser plotados como um conjunto de eixos tridimensionais, no qual cada eixo representa uma cor (RGB). O coeficiente de cada eixo define o quanto de cada cor primária será necessário para reproduzir a cor desejada. Na Figura 4, mostra o graficamente o cubo RGB, na qual a quantidade de cada cor primária varia de zero a um valor máximo., matematicamente uma dada cor C_c (Eq. 6) pode ser representada por:

$$C_c = r.R + g.G + b.B \quad (6)$$

Entre eles, R, G e B são as três cores primárias, e r, g e b são os coeficientes de mistura, que geralmente são limitados ao intervalo de 0 a 255. A cor C pode ser desenhada no espaço de cores RGB usando os coeficientes de mesclagem (r,g,b) como coordenadas (Crósta, 2009).

Figura 4. Cubo RGB - os diferentes tons de cinza localizam-se ao longo da diagonal tracejada.



Fonte: Crósta (2009).

2.2.1.3 *Imagens binarizadas.*

As imagens binarizadas são uma técnica comum de processamento de imagem que envolve a conversão da intensidade de cada pixel em um valor binário. Segundo Gonzalez e Woods (2008), a binarização de uma imagem é realizada com base em um determinado limiar, onde pixels com intensidades maiores que o limiar é atribuído ao valor binário 1, enquanto pixels com intensidades menores que o limiar é atribuído ao valor binário 0.

As imagens binarizadas são frequentemente usadas em aplicações de detecção de bordas, segmentação e reconhecimento de padrões. De acordo com Russ (2002), a detecção de bordas em imagens binarizadas pode ser realizada de forma eficiente por meio da aplicação de um operador de Sobel ou de Canny. Esses operadores podem ajudar a identificar as bordas da imagem, que podem ser usadas para segmentação e reconhecimento de padrões.

As imagens binarizadas também são comumente usadas em aplicações de segmentação, que envolvem a divisão da imagem em diferentes regiões com base em características específicas, como cor, textura ou forma. De acordo com Theodoridis e Koutroumbas (2008), a segmentação em imagens binarizadas pode ser realizada de forma eficiente por meio da aplicação de técnicas de limiarização, crescimento de região ou detecção de bordas.

Outra aplicação comum de imagens binarizadas é o reconhecimento de padrões, que envolve a identificação de objetos em uma imagem com base em suas características

específicas. Segundo Suri *et al.* (2004), o reconhecimento de padrões em imagens binarizadas pode ser realizado por meio da aplicação de técnicas de extração de características, como a transformada de Hough ou a análise de momentos.

Em conclusão, as imagens binarizadas são um tipo comum de imagem digital que apresenta valores binários em vez de intensidades de cores. Essas imagens são frequentemente usadas em aplicações de detecção de bordas, segmentação e reconhecimento de padrões em aplicações de processamento de imagem. Podemos entender melhor com a Figura 5 um exemplo de binarização .

Figura 5. Exemplo de imagens binarizadas.



Fonte: Autoria própria (2023).

2.2.2 Principais formatos de imagens

As imagens digitais são arquivos digitais que representam imagens visuais, e existem vários formatos disponíveis para armazená-las. Segundo Cenedese *et al.* (2020), os formatos mais comuns são JPEG, PNG, GIF, BMP, TIFF e SVG. Cada formato tem suas próprias características e é usado em diferentes situações.

O formato JPEG (*Joint Photographic Experts Group*) é um dos formatos mais populares para imagens fotográficas, e usa compressão com perda para manter o tamanho do arquivo relativamente pequeno. Segundo Zhou *et al.* (2020), a compressão JPEG é baseada em uma transformada discreta do cosseno (DCT), que reduz a redundância das informações da imagem para economizar espaço.

O formato PNG (*Portable Network Graphics*) é um formato de imagem sem perda que é adequado para gráficos, ícones e imagens com transparência. Segundo Hentati *et al.* (2021),

o PNG usa um algoritmo de compressão baseado em diferenças (delta), que reduz o tamanho do arquivo sem perda de informação.

O formato GIF (*Graphics Interchange Format*) é um formato de imagem que suporta animações e transparência. É comumente usado para memes, gráficos simples e ícones. Segundo Lee *et al.* (2019), o GIF usa uma paleta de cores indexada para economizar espaço, e pode ser animado através de uma sequência de imagens.

O formato BMP (Bitmap) é um formato de imagem simples que não usa compressão, o que pode resultar em arquivos grandes. É comum em gráficos e imagens simples. Segundo Liao *et al.* (2019), o BMP é baseado em uma grade de pixels que representam a imagem, e é adequado para imagens com cores simples e sem transparência.

O formato TIFF (*Tagged Image File Format*) é um formato sem perda que é comumente usado em impressão profissional e edição de imagens. Os arquivos TIFF tendem a ser grandes devido à falta de compressão. Segundo Chu *et al.* (2021), o TIFF usa uma estrutura de dados baseada em tags para armazenar informações adicionais sobre a imagem, como metadados e informações de calibração.

Finalmente, o formato SVG (*Scalable Vector Graphics*) é um formato de imagem baseado em vetores que é escalável e pode ser facilmente editado em software de gráficos vetoriais. É comum em gráficos vetoriais, ícones e ilustrações. Segundo Elmer *et al.* (2019), o SVG usa uma linguagem de marcação baseada em XML para descrever a imagem, o que permite uma maior flexibilidade no design e na edição da imagem.

Em resumo, cada formato de imagem digital tem suas próprias características e é adequado para diferentes tipos de imagens e usos. A escolha do formato adequado depende da finalidade da imagem, das necessidades de armazenamento e das características da imagem em si.

2.3 MATLAB.

O MATLAB é um ambiente de programação científica amplamente utilizado em diversas áreas, incluindo engenharia, física, matemática e ciência da computação. Uma das principais características do MATLAB é sua capacidade de manipulação de matrizes e sua ampla gama de funções numéricas e simbólicas (VAN DE GEIJN, 2017). Além disso, o MATLAB oferece diversas ferramentas para análise de imagem, tornando-o uma escolha popular para processamento de imagens.

As ferramentas de análise de imagem do MATLAB permitem realizar tarefas como segmentação, detecção de bordas, filtragem e reconstrução de imagens. A segmentação é um processo de divisão da imagem em regiões significativas, com base em suas características. A detecção de bordas envolve a identificação de transições significativas na intensidade dos pixels da imagem, o que pode ser útil para detectar contornos. A filtragem permite a remoção de ruído ou a realce de certas características da imagem. A reconstrução de imagens envolve a criação de uma imagem a partir de sua representação matemática (GONZALEZ; WOODS, 2018).

Entre as ferramentas de análise de imagem do MATLAB, destacam-se o *Image Processing Toolbox* (Caixa de ferramentas de processamento de imagem) e o *Computer Vision Toolbox* (Caixa de Ferramentas de Visão Computacional). O *Image Processing Toolbox* (Caixa de ferramentas de processamento de imagem) contém uma variedade de funções para processamento de imagens, incluindo filtros, transformações geométricas, operações morfológicas e segmentação (MATHWORKS, 2023). O *Computer Vision Toolbox* (Caixa de Ferramentas de Visão Computacional) oferece funções para análise de imagens em tempo real, detecção de objetos, rastreamento de objetos e visão estéreo (MATHWORKS, 2023).

O MATLAB também oferece suporte para processamento de imagens em paralelo, permitindo a aceleração de operações em imagens grandes ou complexas (ALI, et al., 2021). Além disso, o MATLAB oferece integração com outras ferramentas de processamento de imagem, como o OpenCV e o ImageJ (MATHWORKS, 2023).

O MATLAB é uma ferramenta poderosa para análise de imagens, oferecendo uma ampla gama de funções para processamento de imagens e integração com outras ferramentas populares. As ferramentas de análise de imagem do MATLAB são utilizadas em diversas áreas, incluindo medicina, biologia, engenharia e ciência da computação, para análise de dados de imagem e extração de informações relevantes.

2.4 METODO DOS MINIMOS QUADRADOS

O método dos mínimos quadrados é uma técnica amplamente utilizada para encontrar a linha de melhor ajuste em um conjunto de dados, por meio da minimização da soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e previstos. A análise de regressão linear é um exemplo de aplicação desse método, em que se busca encontrar a relação linear entre duas variáveis, a variável dependente (y) e a variável independente (x), por meio da Eq. 7. (DRAPER; SMITH, 1998)

$$y = m_0 + b \quad (7)$$

onde m_0 é o coeficiente angular da reta e b é o coeficiente linear.

O método dos mínimos quadrados é aplicado para encontrar os valores de m e b que melhor se ajustam aos dados observados. Em outras palavras, o objetivo é encontrar a combinação de valores de m e b que minimiza a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e previstos. Essa minimização é feita por meio do cálculo das derivadas parciais em relação a m e b , igualando-as a zero e resolvendo o sistema de equações resultante. Assim, podemos obter as equações para m_0 e b , em termos dos valores observados de x e y representado pelas Eq. 8 e Eq. 9, respectivamente.

$$m_0 = \frac{(n\Sigma xy - \Sigma x \Sigma y)}{(n\Sigma x^2 - \Sigma x^2)} \quad (8)$$

$$b = \frac{(\Sigma y - m\Sigma x)}{n} \quad (9)$$

onde n é o número de observações.

Essas equações são a base para a análise de regressão linear, permitindo que sejam encontrados os valores de m e b que melhor se ajustam aos dados. Uma vez obtidos esses valores, pode-se utilizar a equação $y = m_0 + b$ para fazer previsões sobre os valores de y para determinados valores de x .

Além disso, a análise de regressão linear permite ainda a realização de testes estatísticos para avaliar a significância da relação entre as variáveis e a qualidade do ajuste da reta aos dados. Esses testes são baseados na análise de variância e no cálculo do coeficiente de determinação (R^2), que mede a proporção da variabilidade dos valores de y explicada pela relação linear com x .

3. APARATOS EXPERIMENTAIS E TECNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM.

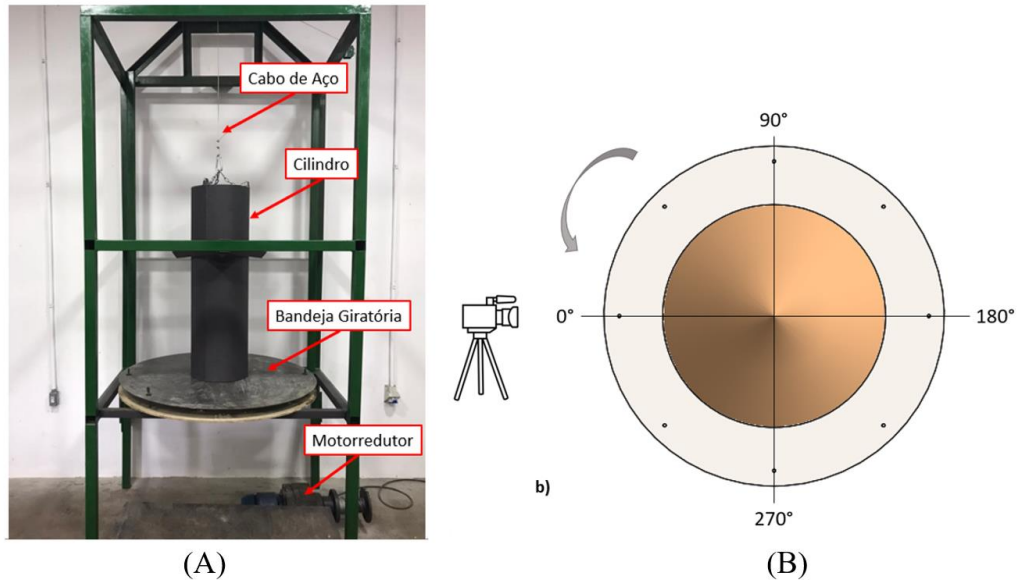
3.1 MEDIÇÃO DO ÂNGULO DE REPOUSO.

3.1.1 Descrição dos aparatos

Para a realização dessa parte do presente trabalho foi utilizada uma bancada já existente no laboratório *fluidpar*, e uma amostra de material, afim de exemplificar o funcionamento do ensaio. Para se obter a pilha de material que se deseja obter o ângulo de repouso é utilizado um cilindro de 325 mm e diâmetro externo e 1050 mm de comprimento, e uma bandeja giratória de 1100 mm onde se forma a pilha de material, o inchamento do cilindro para a formação de

pilha é realizado por um cabo de aço tracionado por um motorreductor e controlado por um inverso de frequência mostrado na Figura 6.

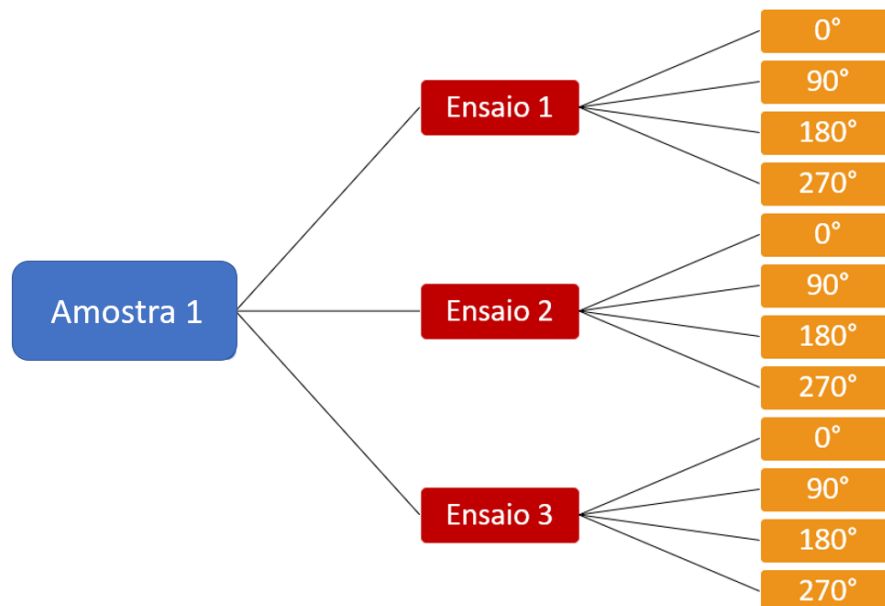
Figura 6. Bancada do ângulo de repouso, vista frontal(A); bandeja giratória, vista superior(B).



Fonte: Autoria própria (2023).

Ressaltando a importância da reprodutibilidade os ensaios devem ser realizados para cada amostra ou condição o ensaio em triplicata, sendo assim cada amostra terá um total de três resultados e cada resultado um total de 12 fotos, melhor visualizado esse esquema na Figura 7.

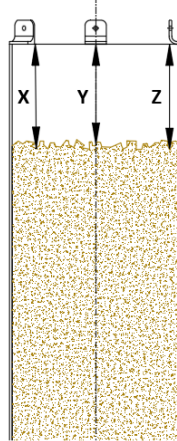
Figura 7. Esquema dos ensaios.



Fonte: Autoria própria (2023).

É utilizado a mesma quantidade de material em casa ensaio, e para conferir a altura de material dentro do cilindro deve-se medir em três pontos o meso para melhor precisão da medição, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8. Medição da altura de material dentro do cilindro.



Fonte: Autoria própria (2023).

A medição dos ângulos na pilha formada foi realizada obtendo os ângulos para ambos os lados oeste(esquerdo) e leste(direito) da pilha de minério, conforme mostrado na Figura 9. A imagem precisa conter toda a pilha e a câmera utilizada necessita está em perfeitamente alinhada horizontalmente a mesa para o melhor resultado possível.

Figura 9. Esquemas das medições dos ângulos para a direção oeste e leste da pilha.

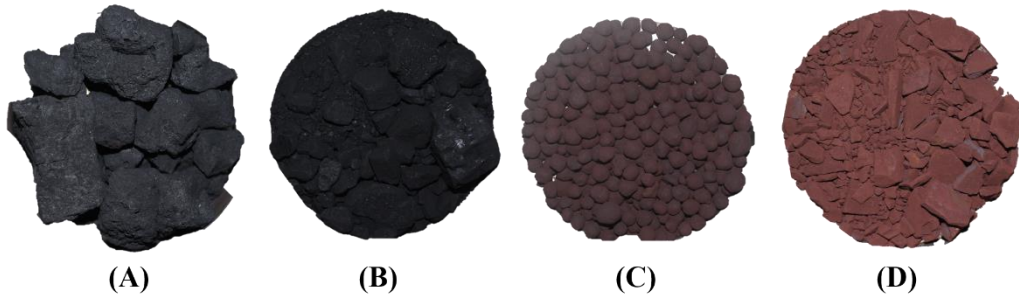


Fonte: Autoria própria (2023).

3.1.2 Material das amostras

Para a realização dos ensaios experimentais, para a formação das pilhas de material granular para a retirada do ângulo de repouso, utilizou-se de quatro materiais distintos, coque de petróleo, cravão (PCI), pelotas e minério granulado. Os mesmos estão presente na Figura 10.

Figura 10. Coque de petróleo (A), cravão PCI (B), pelotas(C) e minério granulado(D).



Fonte: Autoria própria (2023).

3.2 ALGORITMO PARA PROCESSAR ÂNGULO DE REPOUSO.

Para determinar o ângulo de repouso de matérias granulares foi construído um algoritmo que consiga de forma precisa determinar esse ângulo usando processamento de imagens digitais, o programa encontra de forma automática a inclinação da pilha de material utilizando buscando pelo máximo único mínimos quadrados utilizando de uma análise de regressão linear. Para fazer uma análise comparativa e validar a eficiência do algoritmo criado, será retirado o ângulo de repouso com o *software* AutoCad.

O primeiro passo do algoritmo criado consiste em abrir o arquivo desejada. A imagem utilizada nesse exemplo e um material sem classificação apresentado na Figura 11, apenas para fins de exemplificar o funcionamento do código construído. utilizando a função `imread` que permite a importação de diversos formatos de arquivos de imagem e a associação de cada pixel à um emento matricial. O código abaixo foi usado para abrir a imagem no Matlab:

```
IM = imread('a.jpg');
```

Figura 11. imagem normal.

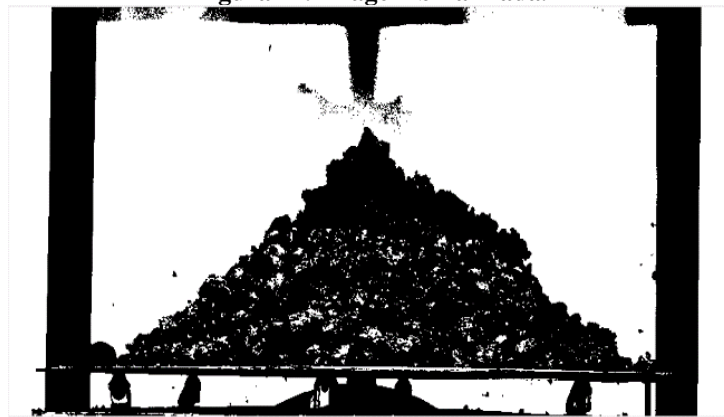


Fonte: Autoria própria (2023).

Logo em seguida utilizando a função `graythresh` e em seguida a função `im2bw` teremos a imagem inicial do programa apresentada com a primeira função em tons de cinza e a segunda nos retorna a imagem binarizada. podemos ver a imagem binarizada na Figura 12. Os comandos no matlab ficam:

```
lvl = graythresh (I);  
BW = im2bw (I, lvl);
```

Figura 12. Imagem binarizada.



Fonte: Autoria própria (2023).

Observa-se que existem espaços vazios dentro da pilha de material, esses espaços vazios podem ser considerados ruídos, e não são desejados para essa aplicação. Para remove-los será utilizado a função `Imfill`(Figura 13, A) e a função `Imopen`(Figura 13, B). A função `imfill` é usada para preencher os espaços vazios dentro da pilha, e a função `imfill` é usada para realizar

uma operação de abertura em uma imagem binária essa operação remove pequenos objetos ou detalhes. As linhas de comando utilizadas estão apresentadas a seguir:

```
BW2 = imfill(1-BW, 'holes');
afterOpening = imopen(BW2,B);
```

Figura 13. Imagem com comando imfill (A); Imagem com o comando imopen (B).



Fonte: Autoria própria (2023).

Em seguida com o intuito de suavizar os contornos é aplicado a função imclose (Figura 14, A). como apenas os pixels da borda da pilha de material são desejados, aplica-se a função edge os pixels internos da pilha são removidos (Figura 14, B). Ambos os comandos estão apresentados respectivamente abaixo.

```
closeBW = imclose(afterOpening,B);
c = edge(closeBW, 'canny');
```

Figura 14. Imagem com comando imclose (A); Imagem com o comando edge (B).

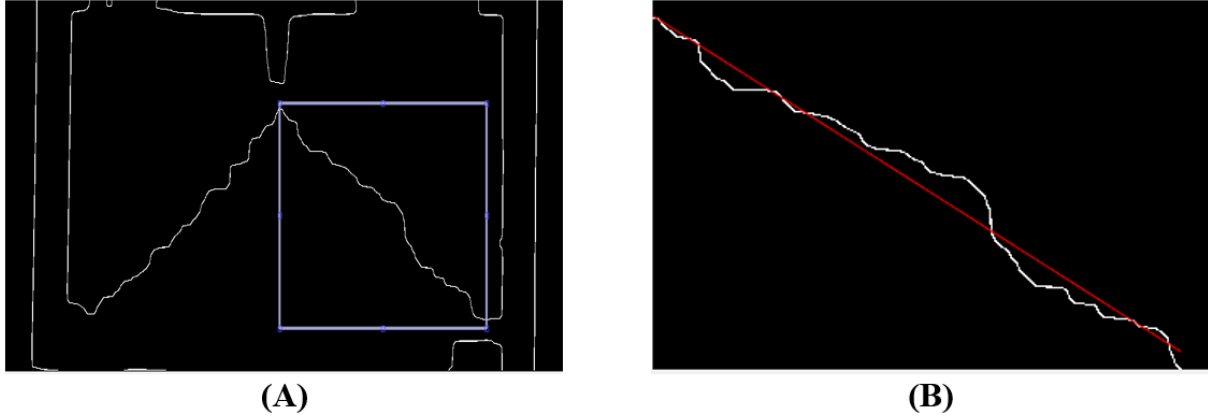


Fonte: Autoria própria (2023).

Para escolher o lado que deseja-se obter o ângulo de repouso usa-se a função imcrop, e após ela aplica-se a função find, que serve para selecionar as coordenadas dos pixels selecionados pela função imcrop e depois aplica a função fitlm, que retorna um modelo de

regressão linear das resposta de colunas dos pixels contidos no contorno pilha. Apresenta-se a função `imcrop` na Figura 15 (A) e na Figura 15 (B) o comando `fitlm` e o ajuste da reta gerada pelo método da regressão linear.

Figura 15. Imagem com comando `imcrop` (A); Imagem com o comando `edge` (B).



Fonte: Autoria própria (2023).

O ângulo a ser procurado é o arcotangente do coeficiente angular ajustado, e é encontrado com a seguinte função:

```
mdl.Coefficients.Estimate
```

O primeiro valor é o primeiro coeficiente (o intercept), o segundo é o angular (que interessa). Então seu ângulo é:

```
Ang=atan (mdl.Coefficients.Estimate (2) )
```

A plataforma do Matlab retorna os resultados da forma apresentada na Figura 16 para o lado direito da pilha e na Figura 17 para o lado esquerdo.

Figura 16. Ângulo para o lado direito.

```
ans=
    9.9573
    0.6607

ang=
    0.5838
ang_graus=
    33.4600
```

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 17. Ângulo para o lado esquerdo.

```
ans=
    243.4031
   -0.6951

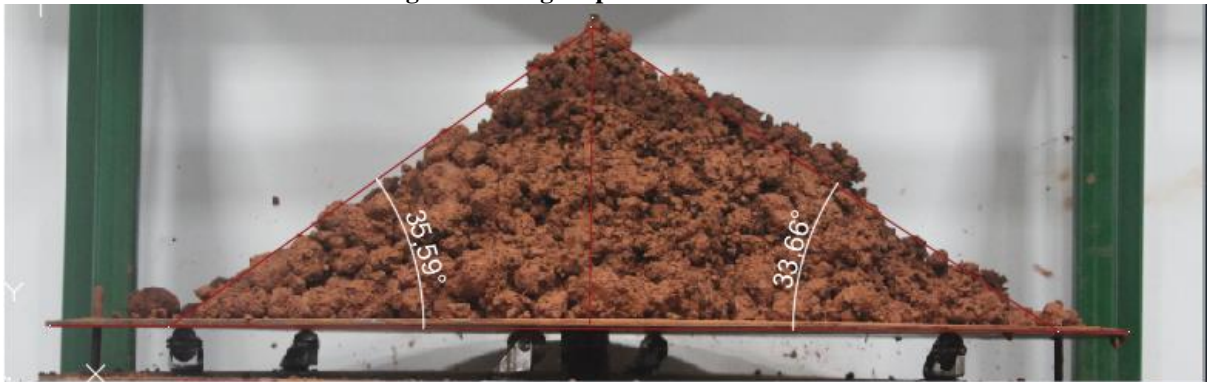
ang=
   -0.6074

ang_graus=
   -34.800
```

Fonte: Autoria própria (2023).

Com o intuito de comparar os resultados obtidos com o algoritmo foi retirado os ângulos de repouso da pilha utilizando o Autocard, os resultados do ângulo tirado com o AutoCAD estão expostos na Figura 18.

Figura 18. Ângulo para com AutoCAD.



Fonte: Autoria própria (2023).

Pode-se observar que no programa desenvolvido no Matlab obteve-se o um ângulo de $33,46^\circ$ no lado direito do ângulo de repouso, já no AutoCad obteve-se um ângulo de $33,66^\circ$. Por sua vez, no lado esquerdo foi encontrado um ângulo de $34,80^\circ$ para o valor do ângulo de repouso no Matlab, em contrapartida no AutoCad obteve-se um ângulo de $35,59^\circ$. Embora, tenha uma variação entre os resultados, isso se dá por conta ângulos retirados com o AutoCAD possuírem erro humano. portanto, os resultados encontrados no algoritmo desenvolvido no software Matlab são confiáveis.

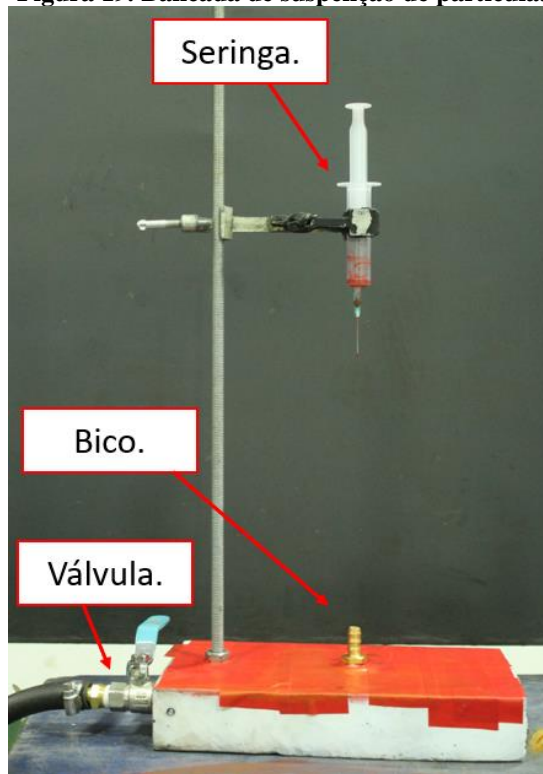
3.3 MEDIÇÃO DE ÁREA DE RECOBRIMENTO.

3.3.1 Descrição dos aparatos.

3.3.1.1 Recobrimento de esfera fluidizada.

Para a avaliação do recobrimento de partícula houve a necessidade da criação de uma bancada para experimentação mostrada na Figura 19, esse experimento consiste em uma partícula suspensa sobre um feixe de ar colocada sobre a ponta de uma seringa e uma gota de tinta é depositada sobre a partícula. A partícula suspensa sobre o feixe de ar se comporta com movimentos de translação e rotação.

Figura 19. Bancada de suspensão de partícula.



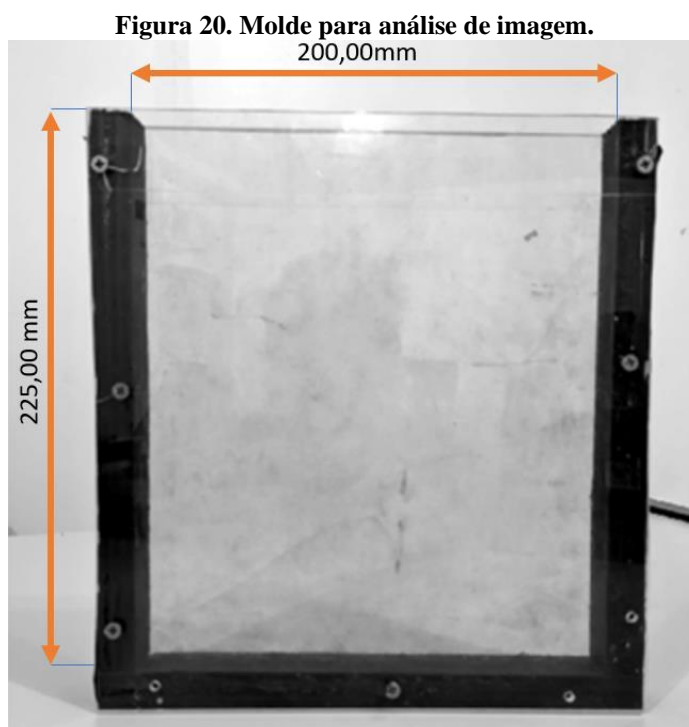
Fonte: Autoria própria (2023).

Para analisar o resultado dos ensaios foi construído também um sistema de base para manter a partícula fixa no centro e rotacionar ela de forma precisa para a captura das imagens.

3.3.1.2 Recobrimento de pelota.

Para se analisar o recobrimento das pelotas, uma vez que possuem forma e tamanhos irregulares, tornou-se necessário a criação de uma moldura para analisar de imagem (MAI). A moldura exposta na Figura 20, consiste em um perfil em U com chapas de acrílico nas

extremidades com distância entre as chapas de 24 mm. As dimensões internas da moldura estão expostas na Figura 20.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.3.2 Material das amostras

3.3.2.1 Recobrimento de esfera fluidizada.

Como partícula foi utilizado esferas de polietileno expandido, a mesmo e disposto comercialmente em diferentes tamanhos. No entanto, de forma experimentais o tamanho de esfera que apresentou menor resistência ao ensaio foi a de 35 mm. A tinta utilizada corresponde ao corante de tinta da marca xadrez a base de água (figura 21).

Figura 21. Tinta usada.

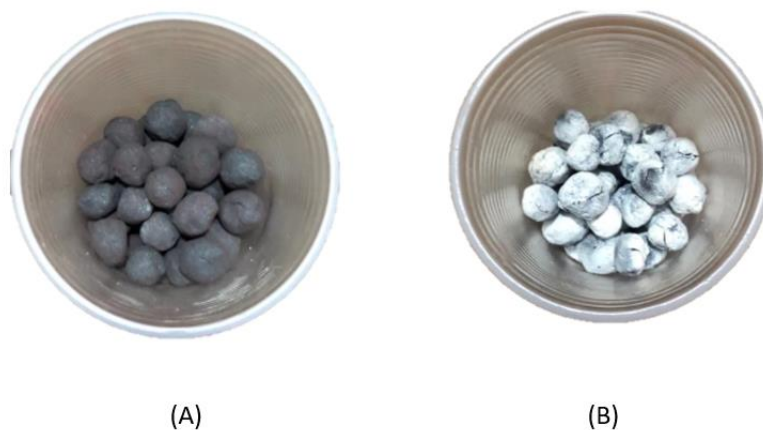


Fonte: Autoria própria (2023).

3.3.2.2 Recobrimento de pelota.

Nesse experimento foram utilizados como material pelotas tingidas de pigmentação branca e misturadas a outras sem pigmentação. A figura 22 apresenta ao lado esquerdo (A) pelotas sem recobrimento de pigmentação e no lado direito (B) temos pelotas com recobrimento. A tinta utilizada para o recobrimento foi a tinta *Spray Primer Fundo 350MI/250G* branca da empresa Tekbond.

Figura 22. (A) pelotas sem recobrimento de pigmentação;(B)pelotas com recobrimento de pigmentação.



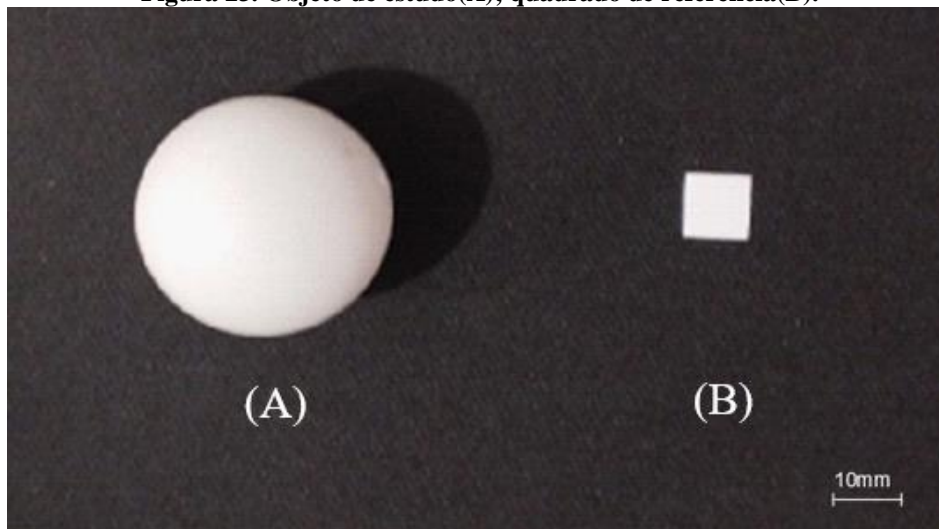
Fonte: Autoria própria (2023).

3.4 ALGORITMO E FUNCIONAMENTO PARA ANÁLISE DE ÁREA DE RECOBRIMENTO

Para a análise dos dois ensaios de recobrimento foi contruído um algoritmo que tem como base a contabilização dos pixels de determinada tonalidade de cor, ou faixas da variação do espectro RGB.

Compreender o algoritmo construído é de suma importância a fim de se obter o conhecimento dos comandos utilizados. Para exemplificar e expor os comandos, utilizou-se dois objetos de estudo (Figura 23,A) e outro como objetos de referência (Figura 23,B), sendo o objeto de estudo uma esfera plástica com diâmetro de 37,95mm e o de referência um quadrado de papel branco com a dimensão de 10x10mm.

Figura 23. Objeto de estudo(A); quadrado de referência(B).



Fonte: Autoria própria (2023).

O primeiro passo consiste em abrir o arquivo desejado utilizando a função *imread* que permite a importação de diversos formatos de arquivos de imagem e a associação de cada pixel à um elemento matricial. O código abaixo foi usado para abrir a imagem no *Matlab*:

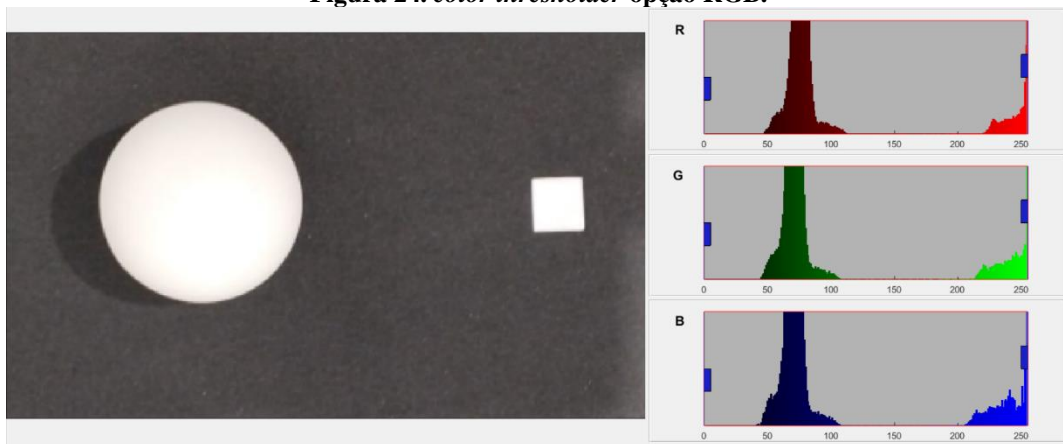
```
IM = imread('cubo.jpg');
```

Dessa forma a variável *IM* enquadrará a imagem como uma matriz, ressalta-se que as linhas e colunas compreendem respectivamente a largura e altura em pixels. No entanto, há uma terceira dimensão da matriz que corresponde ao canal *RGB* que corresponde as iniciais em inglês de *red* (vermelho), *green* (verde) e *blu* (azul) que são armazenadas separadamente. A

combinação desses canais produz todas as cores possíveis. Essa separação em canais facilita os processos que dependem de uma cor específica ou faixa de cores, como no caso desse trabalho.

Usando a biblioteca de processamento de imagem e visão computacional do *MATLAB*, em específico a ferramenta *color thresholder*, selecionando a opção RGB, pode-se separar pixels de determinada faixa de cores e os demais pixels que não corresponde as faixas selecionadas são removidos da imagem. Pode-se visualizar essa função na Figura 24.

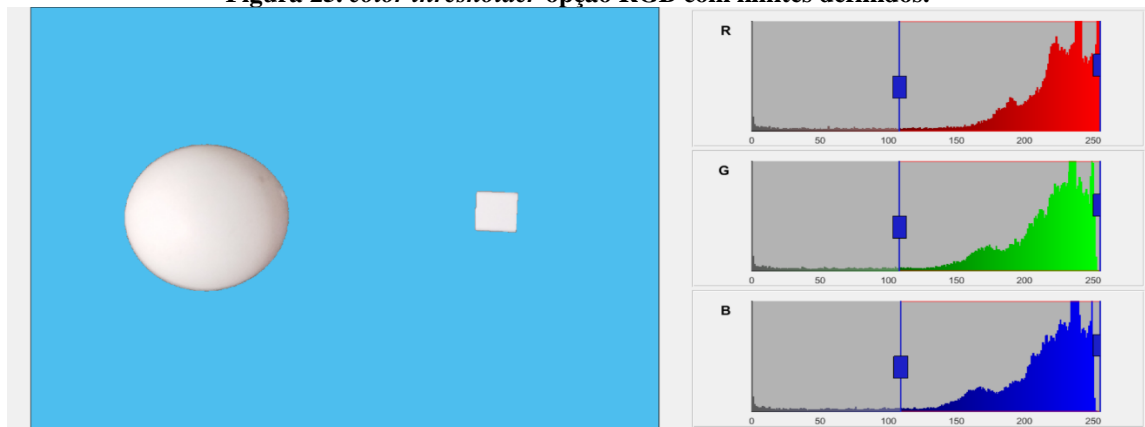
Figura 24. *color thresholder* opção RGB.



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 25, com os limites selecionados para faixas da gama RGB definidos para *red* de 111 a 255, *green* de 117 a 255 e *blue* de 117 a 255, temos a seleção de pixels.

Figura 25. *color thresholder* opção RGB com limites definidos.

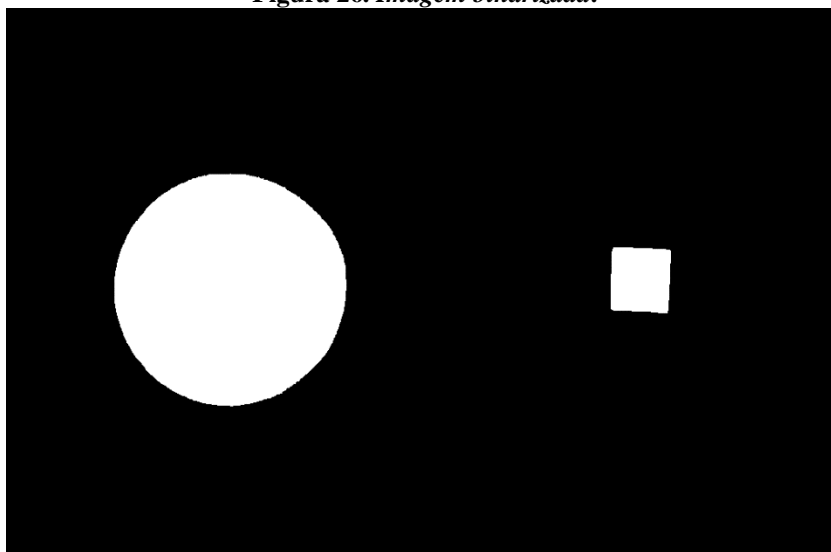


Fonte: Autoria própria (2023).

A partir dessa seleção de gamas RGB criamos função com essa máscara de imagem, onde sempre que aplicada separa os pixels dentro das faixas selecionadas e os demais serão

removidos da imagem. Após isso a imagem retorna os pixels que ficaram de forma binarizada, como se ver na Figura 26.

Figura 26. Imagem binarizada.



Fonte: Aatoria própria (2023).

Por meio da criação da máscara de imagem pode-se aplica-la utilizando o seguinte comando:

```
mascara = createMasktestebola(IM);
```

Para identificar os objetos utilizou-se a função *bwboundaries* essa função identifica objetos presentes em imagens binarizadas (em preto e branco). A função em questão retorna duas variáveis, no qual a primeira corresponde aos contornos dos objetos e a segunda diz respeito aos elementos da matriz corresponde a um inteiro indicando a qual objeto o elemento de matriz faz parte. Pode-se entender essa função como representação desses objetos na figura. Desse modo, tem-se exporto a baixo o comando utilizado para aplicação desse recurso.

```
[B,L] = bwboundaries(mascara, 'noholes')
```

Para contar quantos objetos foram identificados e excluir objetos que podem ser considerados ruídos utilizados o comando a baixo:

```
qtd = sum([stats.Area] > 0)
```

O comando anterior pode excluir objetos que tenham um número de pixels abaixo de um valor pré-definido. Logo, uma forma de remover os ruídos na imagem, caso haja

necessidade. Ruído de uma imagem corresponde em alterações de cor e brilho, em geral elementos que representam as mensagens da qual se acredita transmitir na imagem de estudo.

Utilizando a ferramenta *regionprops* pode-se medir propriedades da imagem como perímetro, centroide, área e diversos outros. Para aplicação desta ferramenta foi utilizado a linha de comando exposta a baixo:

```
stats = regionprops(L, 'Area')
```

Por meio da utilização do mesmo recurso *regionprops* atribuindo a extensão *table* apresentado em forma de tabela os valores de áreas dos objetos identificados. Apresentado a seguir;

```
props = regionprops('table', mascara, 'area')
```

Utilizando o recurso *sum* criamos uma variável com a soma de todas as áreas. Linha de comando utilizadas a baixo:

```
areaPixel_total = sum(props.Area)
```

A plataforma do Matlab retorna os recursos da forma apresentada na Figura 27. No entanto para melhor visualização os dados foram expostos na Tabela 1.

Figura 27. Resposta do matlab aos comandos.

```
qtd =  
    2  
  
props =  
    Area  
    _____  
    67685  
    6010  
  
areaPixel =  
    73695
```

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 1. Resultado objeto de estudo e de referência

Objeto	Área(pixels)
circulo	67685
quadrado de referência	6010
Área total	73695

Fonte: Autoria própria (2023).

Com o intuito de uma melhor visualização do resultado obtido, o código a seguir apresenta uma forma eficiente de exibi-lo. Neste caso, o referido código permite a visualização dos contornos obtidos pela função *bwboundaries* e exibindo as áreas calculadas pela função e *regionprops*.

```

imshow(IM);

title(sprintf('\fontsize{16}{Existem %d objetos selecionados nessa
imagem}', qtd));

hold on

for k = 1:length(B)

    area = stats(k).Area;

    if area > 0

        boundary = B{k};

        plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'black', 'LineWidth', 2);

        text(boundary(1,2), boundary(1,1), sprintf('%.0f',area),...

            'Color', 'white',...

            'FontSize', 12,...

            'FontWeight', 'bold',...

            'BackgroundColor', 'black');

    end

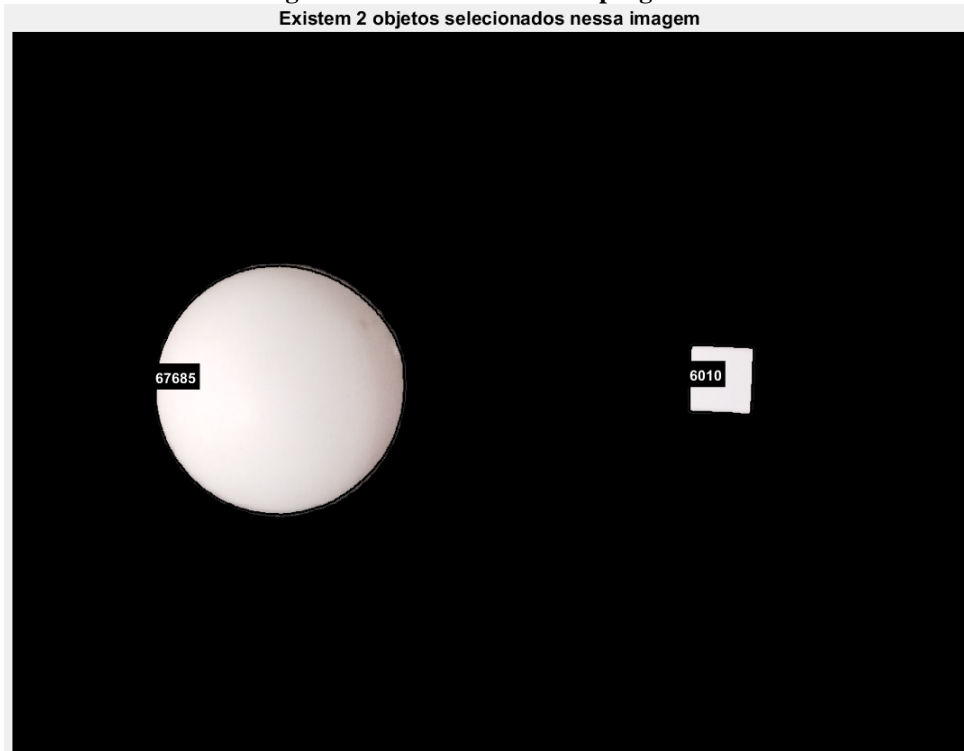
end

hold off

```

Na Figura 2, temos como o resultado final será exibido. E o código montado encontra-se no Apêndice 1.

Figura 28. Resultado final do programa.
Existem 2 objetos selecionados nessa imagem



Fonte: Autoria própria (2023).

Observa-se que o método de análise considera a imagem plana, não levando em consideração a distorção provocada pela curvatura do objeto esférico. todavia, conforme Waithira (2013) durante o estudo teóricos para o desenvolvimento do método de análise, os resultados da fração media do revestimento foram insensíveis a distorção provocada pela curvatura da partícula, embora a abordagem da imagem plana tenha provocado maior dispersão na análise.

Sabendo que a área do quadrado na imagem tem área igual a 100 mm^2 e equivalente a 6010 pixels, pode-se calcular a área da esfera que é composta por 67685 pixels, assume esse valor como valor observado (A_1), e calcula-se ele em milímetros na Eq. 10.

$$A_1 = \frac{67685 \text{ pixels} * 100 \text{ mm}^2}{6010 \text{ pixels}} \quad (10)$$

$$A_1 = 1126 \text{ mm}^2 \quad (11)$$

Considera-se a esfera como um círculo por conta da análise considerar a área plana, calcula-se a área dela pelo seu diâmetro de $37,95 \text{ mm}^2$, assume-se a nomenclatura desse valor como valor real (A_2), calculado na Eq 12.

$$A_2 = \pi r^2 \quad (12)$$

$$A_2 = \pi(37,95/2)^2 \quad (13)$$

$$A_2 = 1131,13 \text{ mm}^2 \quad (14)$$

Com os dois valores anteriores e possível calcular o erro relativo entre eles na Eq. 15.

$$ER = \frac{(A_2 - A_1)}{A_1} * 100 \quad (15)$$

$$ER = 0,43\% \quad (16)$$

No que se refere ao cálculo do erro relativo, conforme apresentado pela Eq. 16, o mesmo foi calculado levando em consideração os valores real e observado, sendo estes (Inserir o valor do real) e (valor observado), respectivamente. Diante do resultado obtido, nota-se que o valor observado está próximo do valor real com um erro relativo equivalente a 0,4%.

4. RESULTADOS

4.1 MEDIÇÃO DO ÂNGULO DE REPOUSO.

Com o intuito de diversificar e enriquecer os resultados, as quatro amostras citadas anteriormente foram ensaiadas com diferentes umidades Indicadas Na Tabela 2. Por conta dos ensaios gerarem uma quantidade grande de imagens, as mesmas estão expostas no Apêndice 2.

Tabela 2. Umidades utilizadas

Amostra	Umidades usadas (%)				
Coque de petróleo	1,5	3,2	4,7	6,2	8,0
carvão PCI	5,0	6,2	7,4	8,6	10,0
Pelotas	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5
Minério granulado	1,8	3,2	4,6	6,0	7,3

Fonte: Autoria própria (2023).

4.1.1 Coque de petróleo

Os ângulos obtidos pelo algoritmo e seus respectivos R^2 das imagens dos ensaios realizados com o material coque de petróleo com as umidades de 1,5%, 3,2%, 4,7% 6,2% e

0	24,43	25,28	0,9596	0,9413	16,74	21,14	0,7675	0,9410	28,55	17,28	0,9373	0,8559
90	29,81	27,72	0,9130	0,9814	21,53	25,59	0,9664	0,9627	13,34	23,89	0,6318	0,8949
180	23,95	27,76	0,7732	0,9510	24,08	20,13	0,9594	0,7863	20,03	24,40	0,9174	0,9032
270	19,02	29,62	0,9395	0,9248	23,92	18,49	0,9016	0,9341	22,84	24,47	0,8826	0,8241

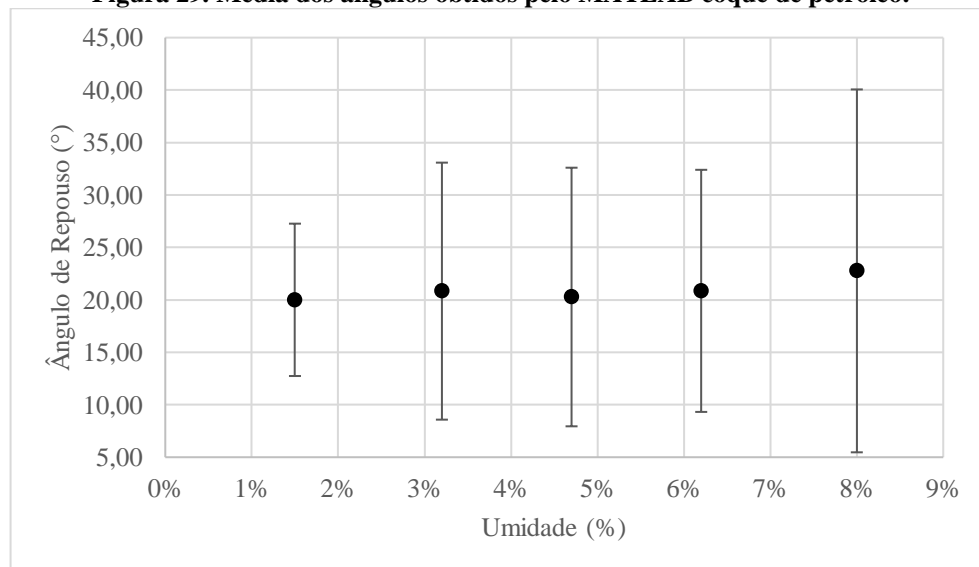
Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 4. Média dos resultados e R² para coque petróleo

Umidade		Média		
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
1,50%	Ângulos	19,41	22,36	18,24
	R²	0,90373	0,91650	0,86690
3,20%	Ângulos	24,48	18,32	19,69
	R²	0,91300	0,89018	0,90585
4,70%	Ângulos	20,49	20,526638	19,79869
	R²	0,89454	0,85751	0,88016
6,20%	Ângulos	23,64	18,25	20,67
	R²	0,94343	0,91751	0,91540
8,00%	Ângulos	25,95	21,45	20,89
	R²	0,92298	0,90238	0,85590

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 29. Média dos ângulos obtidos pelo MATLAB coque de petróleo.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.1.2 Carvão PCI

Os ângulos obtidos pelo algoritmo e seus respectivos R² das imagens dos ensaios realizados com o carvão PCI com as umidades de 5,0%, 6,2%, 7,4%, 8,6% e 10,0%, estão expostos na Tabela 5. Para melhor visualização dos resultados a média de todos os resultados estão apresentados na tabela 6 e na Figura 30.

Tabela 5. Ângulos para a umidade de 5,0%, 6,2%, 7,4%, 8,6% e 10,0% carvão PCI.

Umidade - 5,0%

ângulo de vista da pilha	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
	Ângulo		R ²		Ângulo		R ²		Ângulo		R ²	
	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD
0	28,94	31,34	0,9920	0,9832	26,53	28,76	0,9820	0,9891	30,24	30,97	0,9756	0,9967
90	30,38	30,57	0,9950	0,9894	26,59	31,49	0,9881	0,9902	28,85	32,21	0,9852	0,9923
180	29,26	30,40	0,9820	0,9953	27,73	28,20	0,9839	0,9842	29,68	32,30	0,9937	0,9750
270	28,69	30,85	0,9935	0,9856	29,83	28,83	0,9925	0,9945	30,03	31,24	0,9894	0,9853

Umidade - 6,2%

ângulo de vista da pilha	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
	Ângulo		R ²		Ângulo		R ²		Ângulo		R ²	
	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD
0	30,06	30,63	0,9791	0,9933	32,03	31,19	0,9832	0,9903	32,17	29,39	0,9892	0,9864
90	30,51	32,15	0,9864	0,9884	32,05	31,08	0,9958	0,9821	30,93	31,44	0,9876	0,9745
180	30,65	31,03	0,9962	0,9854	32,29	31,62	0,9877	0,9770	31,86	31,00	0,9889	0,9914
270	30,49	30,65	0,9869	0,9845	33,12	30,34	0,9854	0,9736	32,65	31,40	0,9803	0,9887

Umidade - 7,4%

ângulo de vista da pilha	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
	Ângulo		R ²		Ângulo		R ²		Ângulo		R ²	
	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD
0	32,12	31,19	0,9933	0,9839	33,46	31,91	0,9822	0,9802	30,02	32,00	0,9769	0,9925
90	29,84	29,29	0,9899	0,9903	34,15	31,34	0,9692	0,9876	31,31	29,61	0,9875	0,9817
180	30,92	30,58	0,9926	0,9912	32,81	31,82	0,9895	0,9778	31,08	28,93	0,9926	0,9836
270	29,35	29,46	0,9824	0,9941	31,30	34,07	0,9848	0,9661	29,58	30,74	0,9826	0,9839

Umidade - 8,6%

ângulo de vista da pilha	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
	Ângulo		R ²		Ângulo		R ²		Ângulo		R ²	
	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD
0	28,11	28,47	0,9914	0,9827	30,42	28,81	0,9789	0,9925	32,01	30,62	0,9834	0,9890
90	29,59	29,05	0,9774	0,9866	28,20	29,92	0,9914	0,9891	31,24	31,54	0,9879	0,9782
180	31,27	27,85	0,9821	0,9836	29,58	30,77	0,9938	0,9944	30,56	30,97	0,9900	0,9911
270	28,89	27,58	0,9892	0,9795	29,92	28,96	0,9848	0,9919	31,06	31,96	0,9898	0,9834

Umidade - 10%

ângulo de vista da pilha	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
	Ângulo		R ²		Ângulo		R ²		Ângulo		R ²	
	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD
0	31,91	31,95	0,9884	0,9971	33,19	30,36	0,9093	0,9073	33,87	29,08	0,8990	0,9472
90	31,09	32,82	0,9935	0,9832	34,51	37,75	0,9636	0,8848	33,81	34,14	0,9140	0,9438
180	31,65	31,32	0,9959	0,9880	33,55	35,39	0,9261	0,9188	33,20	31,63	0,9160	0,9682
270	32,26	31,27	0,9911	0,9931	35,17	35,96	0,9118	0,9235	33,77	32,83	0,9610	0,9633

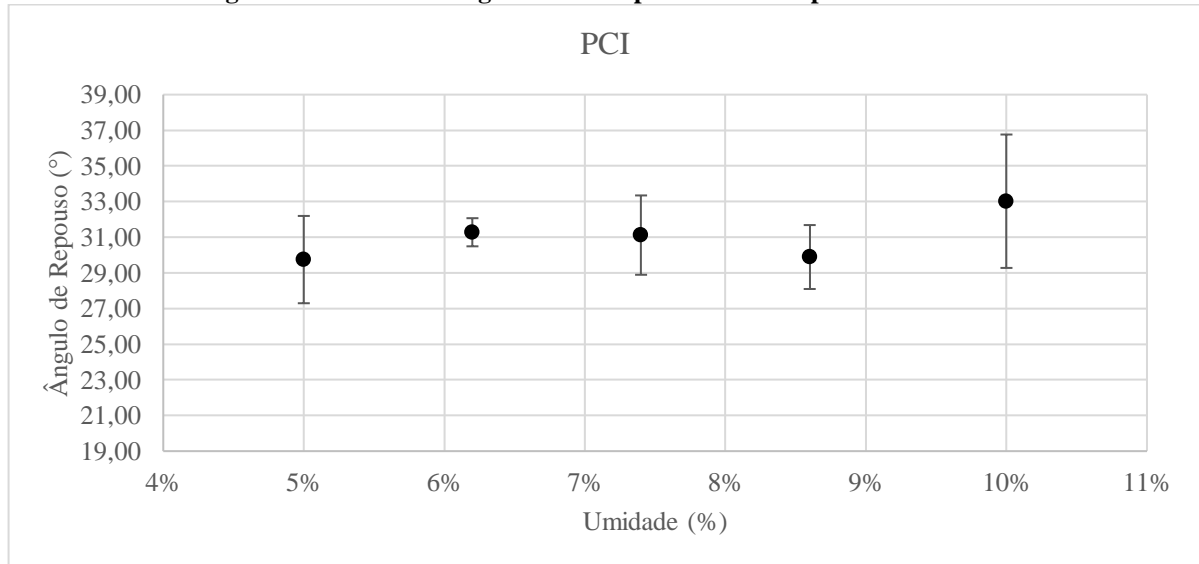
Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 6. Media dos resultados e R² para carvão PCI

Umidade		Média		
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
5,0%	Ângulos	30,05	28,50	30,69
	R²	0,9895	0,9881	0,9867
6,2%	Ângulos	30,77	31,71	31,35
	R²	0,9875	0,9844	0,9859
7,4%	Ângulos	30,34313	32,60641	30,40896
	R²	0,989713	0,979675	0,985163
8,6%	Ângulos	28,85	29,57	31,24
	R²	0,9841	0,9896	0,9866
10,0%	Ângulos	31,79	34,48	32,79
	R²	0,9913	0,9182	0,9391

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 30. Media dos ângulos obtidos pelo MATLAB para carvão PCI.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.1.3 Pelota.

Os ângulos obtidos pelo algoritmo e seus respectivos R^2 das imagens dos ensaios realizados com pelotas para as umidades de 1,5%, 2,5% e 3,5%, 4,5% e 5,5% está exposto na Tabela 7. Para melhor visualização dos resultados a média de todos os resultados estão apresentados na tabela 8 e na Figura 31.

Tabela 7. Ângulos para a umidade de 1,5%, 2,5%, 3,5%, 4,5% e 5,5% para pelotas

Umidade - 1,5%

ângulo de vista da pilha	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
	Ângulo		R^2		Ângulo		R^2		Ângulo		R^2	
	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD
0	20,68	21,45	0,9842	0,9800	23,35	22,01	0,9951	0,9870	22,40	23,25	0,9923	0,9915
90	22,89	21,64	0,9879	0,9879	23,63	21,04	0,9824	0,9809	22,20	22,49	0,9913	0,9763
180	22,88	22,89	0,9945	0,9879	22,77	22,37	0,9911	0,9926	21,41	22,04	0,9925	0,9800
270	22,76	21,58	0,9948	0,9814	22,36	24,84	0,9929	0,9910	22,47	21,03	0,9807	0,9841

Umidade - 2,5%

ângulo de vista da pilha	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
	Ângulo		R^2		Ângulo		R^2		Ângulo		R^2	
	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD
0	23,24	24,56	0,9839	0,9940	21,77	23,81	0,9959	0,9891	24,94	25,19	0,9970	0,9963
90	22,86	24,17	0,9911	0,9946	22,41	23,73	0,9911	0,9964	23,99	25,20	0,9932	0,9971

180	25,10	24,94	0,9914	0,9953	26,69	21,11	0,9911	0,9914	23,08	24,54	0,9887	0,9914
270	24,04	24,78	0,9957	0,9905	24,05	23,32	0,9958	0,9958	24,74	23,01	0,9966	0,9923

Umidade - 3,5%

ângulo de vista da pilha	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
	Ângulo		R ²		Ângulo		R ²		Ângulo		R ²	
	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD
0	19,29	18,86	0,9944	0,9917	20,99	19,69	0,9942	0,9967	20,59	20,83	0,9936	0,9951
90	19,45	19,17	0,9933	0,9957	22,26	19,32	0,9941	0,9928	20,70	21,62	0,9940	0,9916
180	19,66	19,21	0,9950	0,9945	20,87	19,41	0,9967	0,9975	21,29	19,80	0,9975	0,9926
270	19,31	19,57	0,9964	0,9930	19,34	21,67	0,9931	0,9933	19,80	20,98	0,9926	0,9969

Umidade - 4,5%

ângulo de vista da pilha	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
	Ângulo		R ²		Ângulo		R ²		Ângulo		R ²	
	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD
0	21,35	19,88	0,9938	0,9945	20,70	20,22	0,9974	0,9963	19,83	19,55	0,9971	0,9934
90	20,37	20,83	0,9945	0,9922	21,56	20,55	0,9954	0,9949	20,53	19,90	0,9911	0,9932
180	19,87	21,24	0,9930	0,9934	20,09	20,37	0,9972	0,9967	19,72	19,13	0,9921	0,9954
270	20,70	20,32	0,9963	0,9958	20,59	20,45	0,9957	0,9879	20,13	20,09	0,9934	0,9894

Umidade - 5,5%

ângulo de vista da pilha	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
	Ângulo		R ²		Ângulo		R ²		Ângulo		R ²	
	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD
0	21,13	20,72	0,9929	0,9910	21,18	22,01	0,9955	0,9944	22,58	21,71	0,9954	0,9952
90	20,00	20,52	0,9895	0,9909	21,21	22,82	0,9950	0,9920	21,89	24,30	0,9948	0,9932
180	21,07	19,74	0,9943	0,9890	21,93	20,75	0,9937	0,9946	24,96	22,54	0,9934	0,9925
270	20,97	20,21	0,9950	0,9909	21,32	21,87	0,9920	0,9980	23,67	22,89	0,9946	0,9923

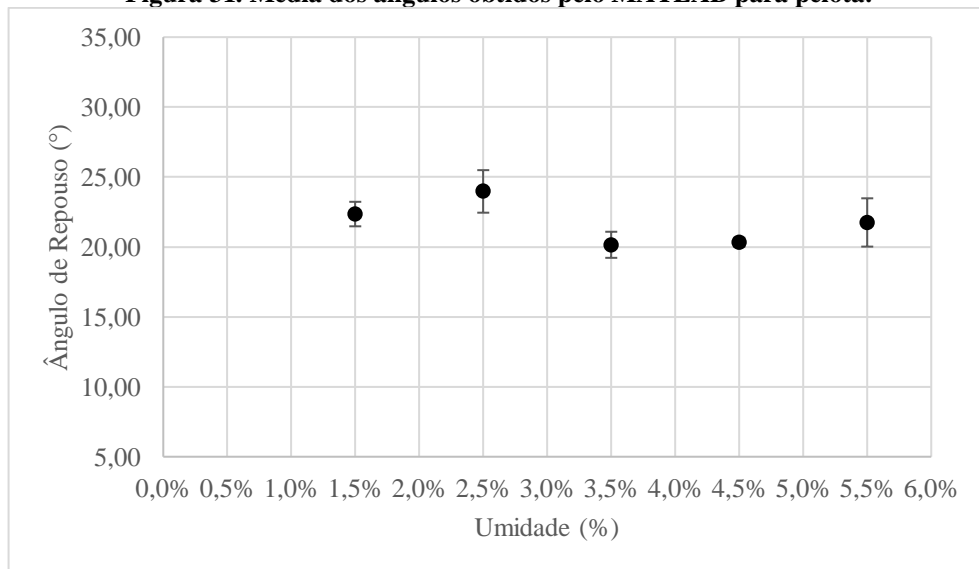
Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 8. Média dos resultados e R² para pelota

Umidade		Média		
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
1,5%	Ângulos	22,10	22,80	22,16
	R ²	0,9873	0,9891	0,9861
2,5%	Ângulos	24,21	23,36	24,34
	R ²	0,9921	0,9933	0,9941
3,5%	Ângulos	19,31	20,44	20,70
	R ²	0,9943	0,9948	0,9942
4,5%	Ângulos	20,57	20,57	19,86
	R ²	0,9942	0,9952	0,9931
5,5%	Ângulos	20,55	21,64	23,07
	R ²	0,9917	0,9944	0,9939

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 31. Média dos ângulos obtidos pelo MATLAB para pelota.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.1.4 Minério granulado

Os ângulos obtidos pelo algoritmo e seus respectivos R² das imagens dos ensaios realizados com minério granulado para as umidades de 1,8%, 3,2% e 4,6%, 6,0% e 7,3% está exposto na Tabela 9. Para melhor visualização dos resultados a média de todos os resultados estão apresentados na tabela 10 e na Figura 32.

Tabela 9. Ângulos para a umidade de 1,8%, 3,2% e 4,6%, 6,0% e 7,3% para minério granulado.

Umidade - 1,8%

da pilha												
0	25,34	25,53	0,9872	0,9735	25,92	25,89	0,9881	0,9897	26,22	25,96	0,9930	0,9904
90	24,11	28,03	0,9636	0,9749	24,97	25,40	0,9880	0,9739	26,58	26,36	0,9930	0,9933
180	27,33	26,35	0,9532	0,9887	25,76	25,96	0,9791	0,9883	25,76	25,13	0,9792	0,9793
270	25,09	24,78	0,9704	0,9805	25,87	23,51	0,9871	0,9794	25,29	27,32	0,9891	0,9878

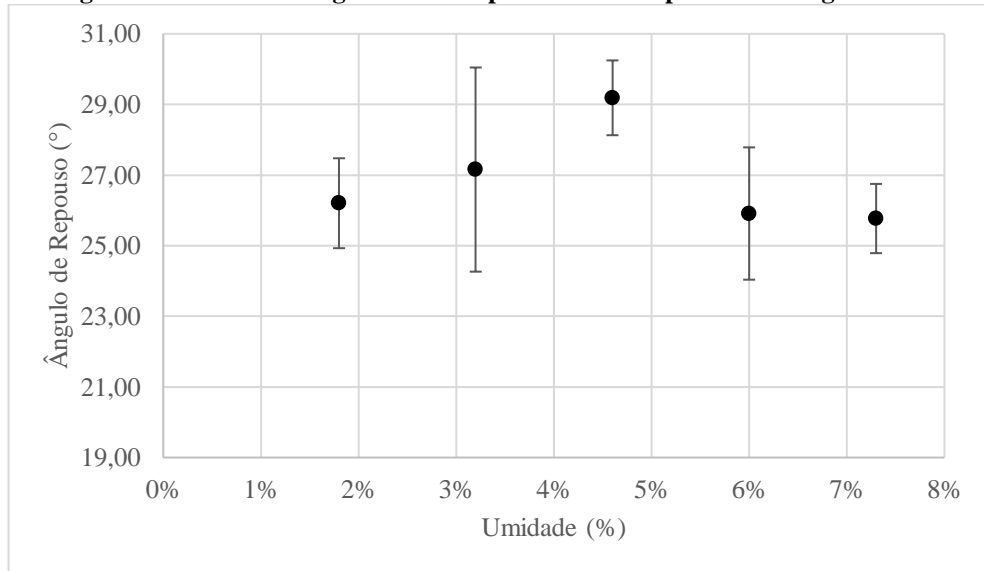
Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 10. Média dos resultados e R² para minério granulado.

Umidade		Média		
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
1,80%	Ângulos	26,011	25,849	26,748
	R ²	0,9866	0,9881	0,9885
3,20%	Ângulos	28,073	26,655	26,739
	R ²	0,9857	0,9847	0,9872
4,60%	Ângulos	29,004	29,272	29,287
	R ²	0,9822	0,9817	0,9803
6,00%	Ângulos	25,455	25,734	26,545
	R ²	0,9781	0,9840	0,9853
7,30%	Ângulos	25,818	25,410	26,079
	R ²	0,9740	0,9842	0,9881

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 32. Media dos ângulos obtidos pelo MATLAB para minério granulado.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.2 RECOBRIMENTO DE ESFERA FLUIDZADA.

Para o recobrimento de partícula realizou-se três ensaios. No primeiro foram depositados sobre a esfera suspensa 20 gotas de tinta, no segundo 50 e no terceiro 100 gotas. Respectivamente correspondem aos ensaios a Figura 33, Figura 34 e Figura 35. Em cada figura possui quatro imagens correspondentes a rotação que foi batida as imagens, 0°(A), 90°(B), 180°(C) e 270°(D)

Com o intuito de facilitar o processamento computacional das imagens, realizou-se a remoção do fundo, deixando somente as esferas, assim diminuindo o esforço computacional para avaliação de cada imagens. Para realizar a seleção dos pixels que são pertencentes a partícula foi usada os seguintes valores para a máscara de imagem utilizando o sistema RGB definidos para red de 0 a 252, green de 0 a 247 e blue de 0 a 240, tem-se na Figura 36 os valores totais das partículas para o gotejamento de 20 gotas, na figura 37 para 50 gotas e a figura 38 para o de 100 gotas. A rotação para cada ensaio, corresponde em 0°(A), 90°(B), 180°(C), 270°(D) nas três figuras. Para contabilizar a área recoberta das partículas, teve a criação de outra máscara de imagem correspondente com os valores de red de 0 a 134, green de 0 a 218 e blue de 0 a 220 foi aplicada sobre as imagens. Os resultados estão expostos na Figura 39 para 20 gotas, Figura 40 para 50 gotas e para 100 gotas a Figura 41. Em cada figura possui quatro imagens correspondentes a rotação que foi batida as imagens, 0°(A), 90°(B), 180°(C) e 270°(D). Para melhor visualização os resultados do valor total da partícula e do recobrimento foi

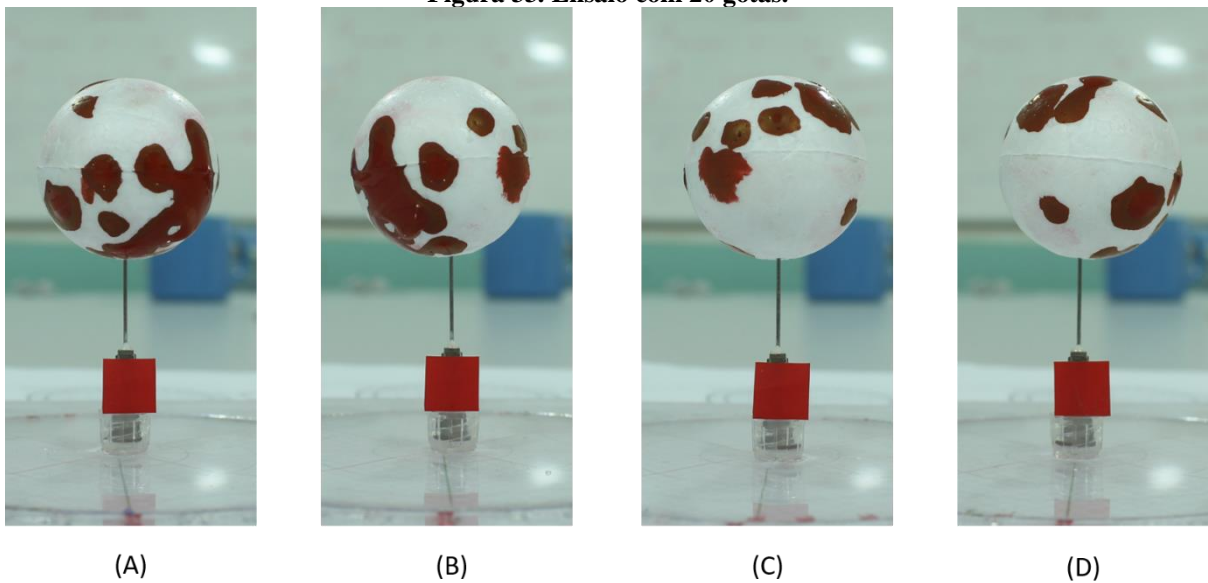
colocado na Tabela 11, onde podemos visualizar o percentual do recobrimento para cada face que fora obtida as imagens.

Tabela 11. Media dos resultados e R^2 para minério granulado.

		valor da esfera (pixels)	valor do recobrimento (pixels)	PORCENTAGEM
ensaio 1 (20 gotas)	0°	10895	4337	40%
	90°	10342	4033	39%
	180°	10603	2338	22%
	270°	10723	2340	22%
ensaio 2 (50 gotas)	0°	8849	3314	37%
	90°	9044	3001	33%
	180°	8955	3246	36%
	270°	8906	3020	34%
ensaio 3 (100 gotas)	0°	8628	6194	72%
	90°	8843	5493	62%
	180°	8775	6331	72%
	270°	8677	7645	88%

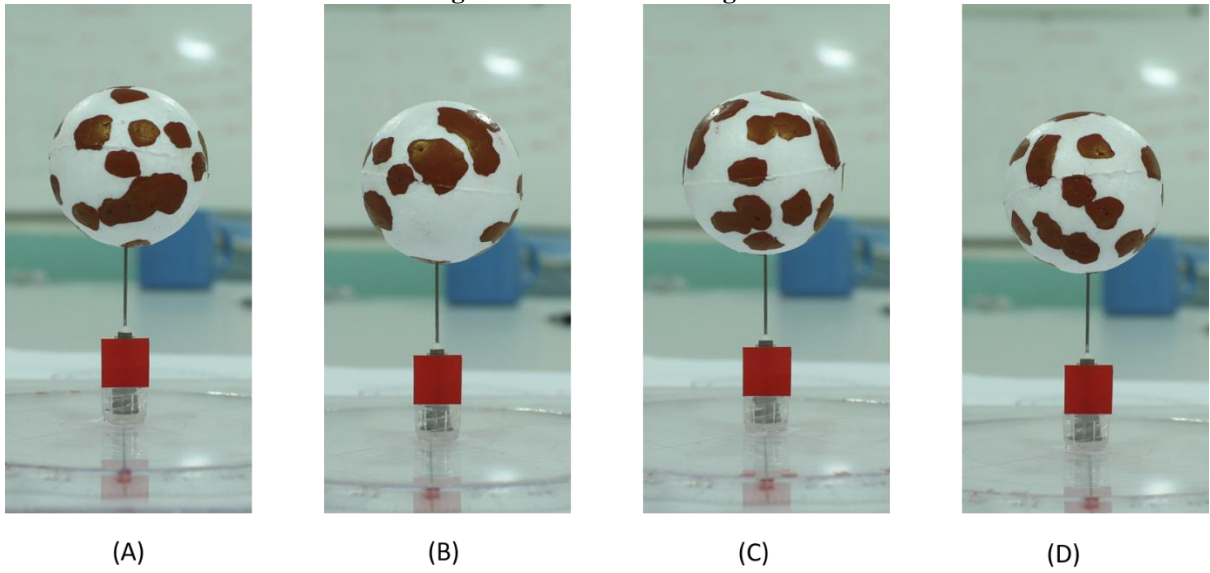
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 33. Ensaio com 20 gotas.



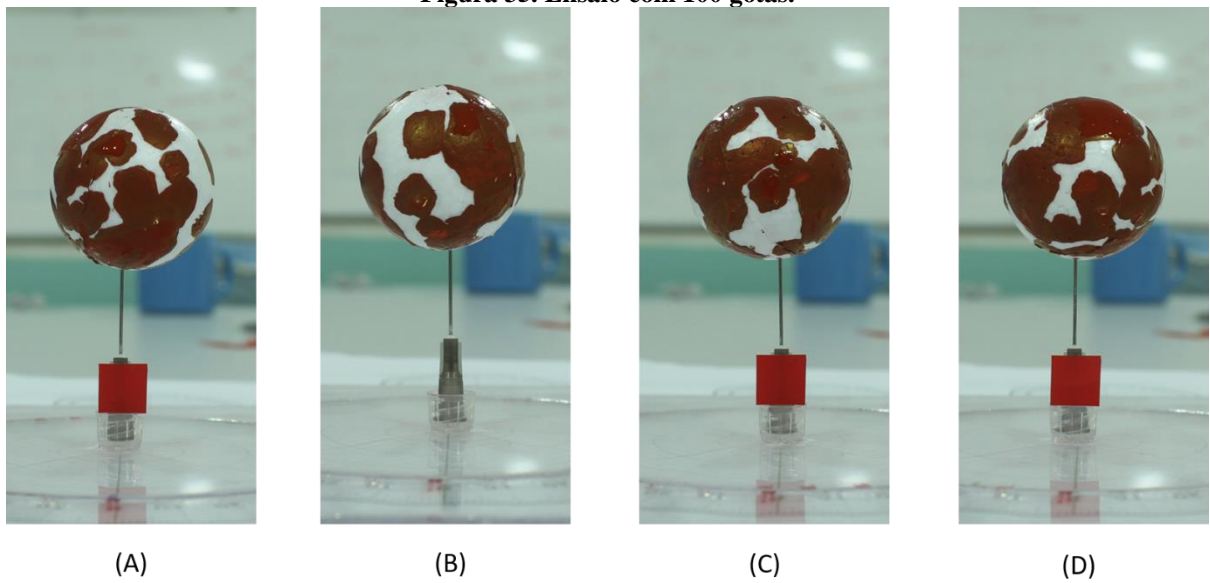
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 34. Ensaio com 50 gotas.



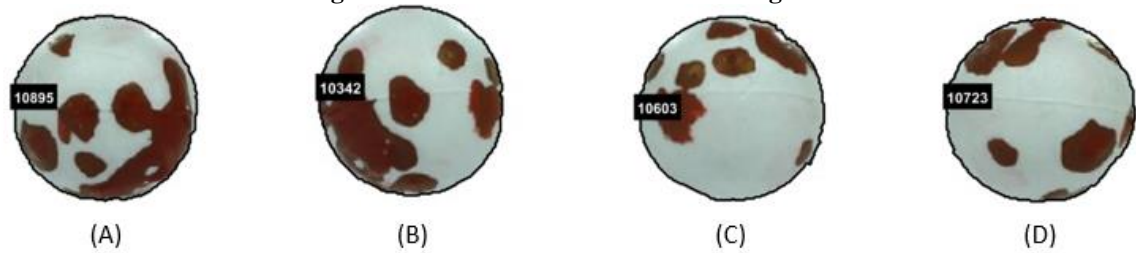
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 35. Ensaio com 100 gotas.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 36. Área da esfera ensaio com 20 gotas.



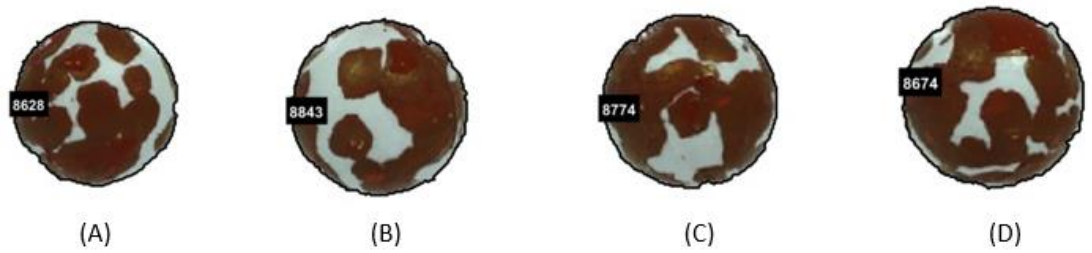
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 37. Área da esfera ensaio com 50 gotas.



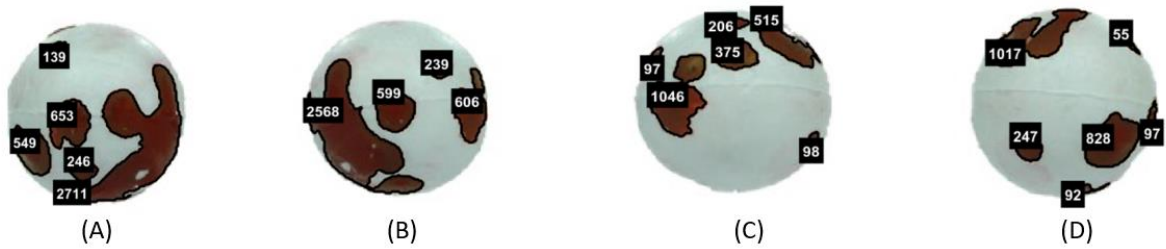
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 38. Área da esfera ensaio com 100 gotas.



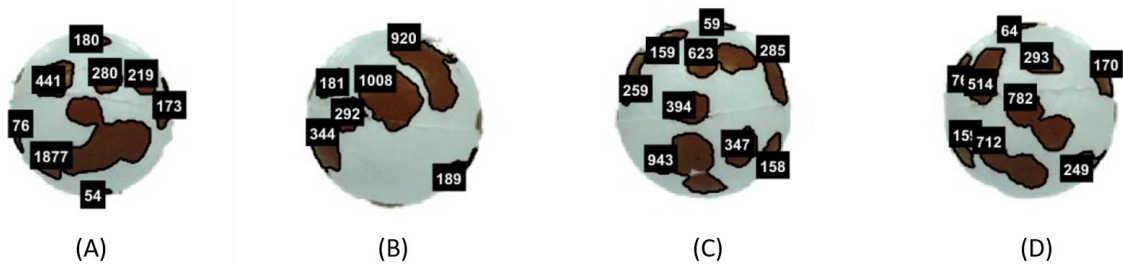
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 39. Área do recobrimento ensaio com 20 gotas.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 40. Área do recobrimento ensaio com 50 gotas.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 41. Área do recobrimento ensaio com 100 gotas.

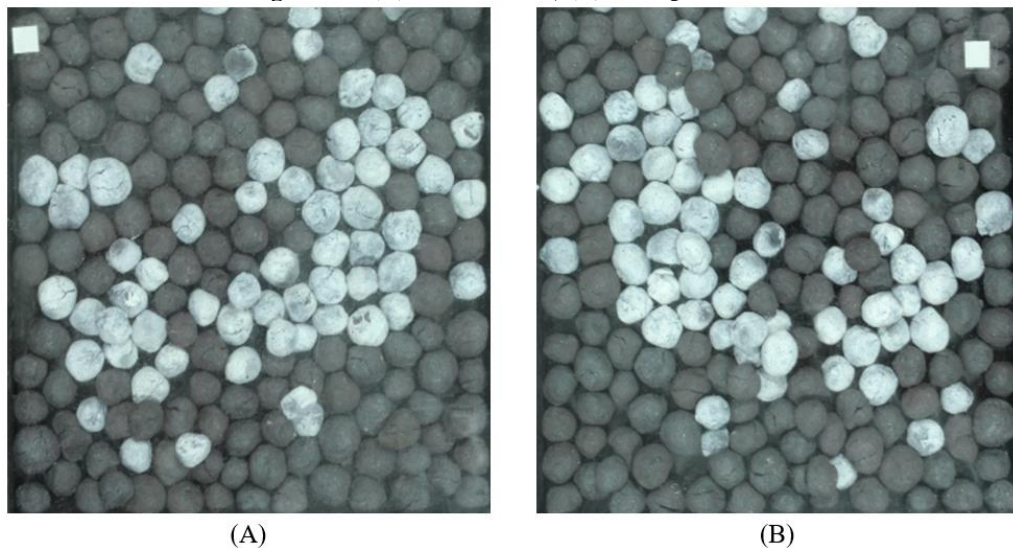


Fonte: Autoria própria (2023).

4.3 RECOBRIMENTO DE PELOTAS

A moldura suporta aproximadamente 1233g de pelotas queimadas. 30 % desse valor foi depositado de pelotas cobertas por pigmentação branca, podemos visualizar os dois lados da moldura com material granular na Figura 42, lado esquerdo (A) com vista frontal e a direita vista posterior (B).

Figura 42. (A) vista frontal; (B) vista posterior.



Fonte: Autoria própria (2023).

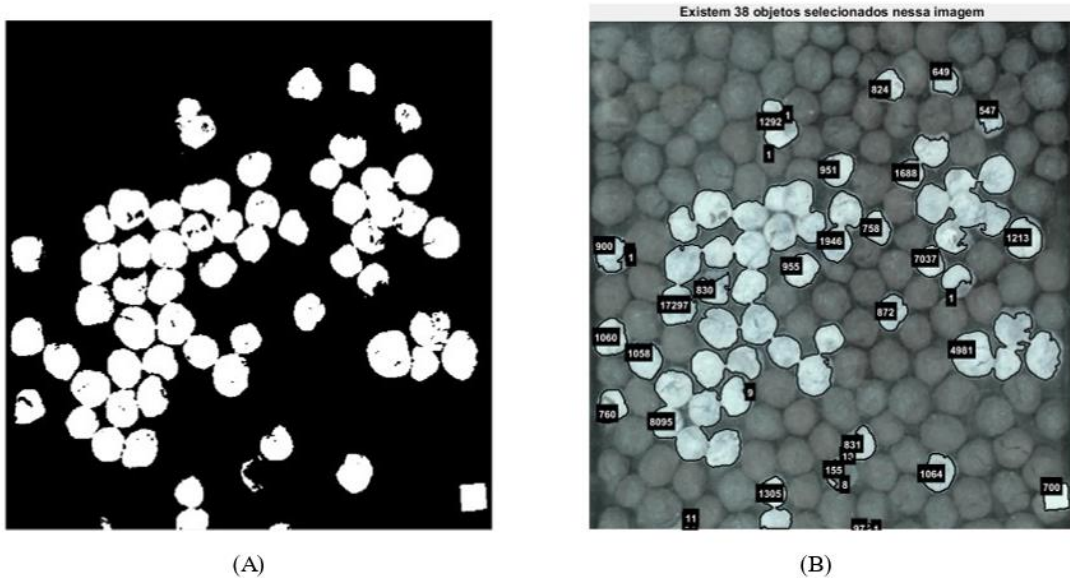
As imagens por possuírem grande complexibilidade para se analisar, foi apenas calculada a área das pelotas recobertas e com as direções do objeto de referência foi calculada a área e pelotas recobertas em mm, uma forma diferente da anterior. A Figura 43 possui os resultados para a vista frontal, na direita tem-se a imagem binarizada(A), isso para melhor

visualizar as pelotas recobertas. Na esquerda o resultado visual que o programa retorna da vista frontal está na Figura 43 (B).

A Figura 44 dispõe dos resultados numéricos apresentados no Matlab com as áreas dos objetos contados e a soma dos mesmos. Para melhor visualização segue os mesmos dados apresentados na Tabela 3.

Tendo que a área do quadrado, objeto de referência, na imagem tem área igual a 100 mm² e equivalente a 700 pixels, pode-se calcular a área de pelotas recobertas subtraindo o valor do objeto de referência do valor total que é 57.965 do v, logo tem-se que o valor da área de pelotas recobertas é de 57.265 pixels. Calcula-se ele em milímetros na Equação 17.

Figura 43. (A) vista frontal binarizada; (B) Resultado vista frontal.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 44. Resultados numéricos apresentados pelo programa para vista frontal.

```

qtd =
    38

props =
    Area      10
           8
           831
           97
    1060     758
    900      824
    760       1
    2         872
    1058     1688
    1        7037
    8095     1064
    17297    649
    1         1
    54       4981
    11       547
    830     1213
    9        700
    1305
    1292
    1  areaPixal_Total =
    955
    1      57965
    1946
    951
    155
  
```

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 12. Resultados para vista frontal.

Quantidade	38			
Área em pixels	1060	951	11	1688
	900	155	830	7037
	760	10	9	1064
	2	8	1305	649
	1058	831	1292	1
	1	97	1	4981
	8095	758	955	547
	17297	824	1	1213
	1	1	1946	700
	54	872		
área total	57965			

Fonte: Autoria própria (2023).

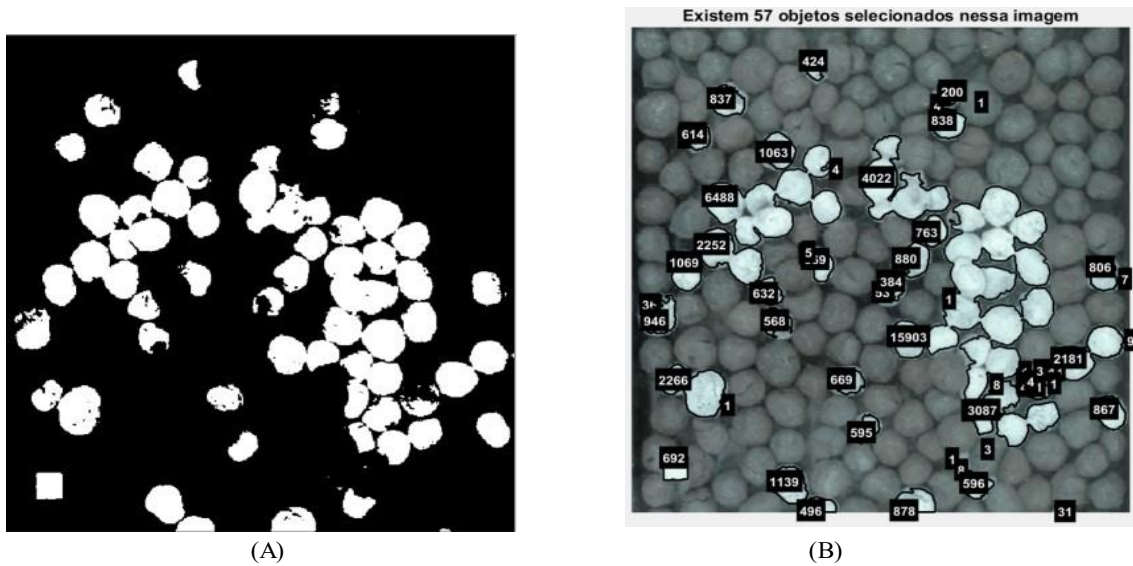
$$A = \frac{57365 \text{ pixels} \cdot 100 \text{ mm}^2}{700 \text{ pixels}} \quad (17)$$

$$A = 8195 \text{ mm}^2 \quad (18)$$

Na Figura 45 encontra-se os resultados para a vista posterior, na direita situa-se imagem binarizada posterior(A) e na esquerda o resultado visual que o programa retorna da vista posterior(B).

A Figura 46 possui os resultados numéricos apresentados no Matlab com a tabela com a área dos objetos contados e a sua soma. No entanto para melhor visualização desses dados, eles estão expostos na Tabela 13.

Figura 45. (A) vista posterior binarizada; (B) Resultado vista posterior.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 46. Resultados numéricos apresentados pelo programa para vista posterior.

```

qtd =          595      areaPixel_Total =
          4022
    57          53      53488
          384
          15903
      props =          878
          880
      Area          763
          838
          4
          7
          36          200
          946          1
          2266          1
          692          8
          1069          596
          1          2
          614          3087
          2252          1
          6488          3
          837          8
          1          8
          632          3
          1063          411
          568          1
          1139          4
          496          3
          424          48
          3          1
          669          2181
          5          31
          669          806
          4          867
  
```

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 13. Resultados para vista posterior

Quantidade	57			
	36	763	669	4
	946	838	5	3
	2266	4	669	48
	692	7	4	1
	1069	200	595	2181
	1	1	4022	31
	614	1	53	806
Área	2252	8	384	867
	6488	596	15903	7
	837	2	878	9
	1	3087	880	3
	632	1	496	411
	1063	3	424	1
	568	8	3	1139
	8	0	0	0
área total	53480			

Fonte: Autoria própria (2023).

Em vista, que a área do objeto de referência é de 692 pixels, pode-se calcular a área de pelotas recobertas subtraindo esse valor do valor total que é 53.488, logo tem-se que o valor da área de pelotas recobertas é de 52.796 pixels. Calcula-se ele em milímetros na Equação 19.

$$A = \frac{57365\text{pixels} \cdot 100\text{mm}^2}{693\text{pixels}} \quad (19)$$

$$A = 7618,47 \text{ mm}^2 \quad (20)$$

5. CONCLUSÃO

A análise de imagem tem se mostrado uma ferramenta promissora para a análise de materiais granulares, permitindo a transmissão de informações precisas sobre as propriedades dos mesmos. Neste trabalho, foi desenvolvido um método de análise de imagem para a orientação do ângulo de repouso e do recobrimento de materiais granulares, utilizando técnicas de processamento de imagens.

A validação do método foi realizada por meio de comparações com resultados obtidos por métodos tradicionais de análise, demonstrando a eficiência e precisão do método. Espera-se que este trabalho contribua para os trabalhos futuros de caracterização de materiais granulares, tornando mais eficiente e precisa a análise.

A aplicação da análise de imagem para a obtenção do ângulo de repouso e do recobrimento de materiais granulares pode reduzir custos e tempo de análise, tornando-se uma alternativa viável para a caracterização desses materiais. Além disso, a análise de imagem pode fornecer informações que seriam difíceis de obter por métodos tradicionais de análise.

Portanto, este trabalho representa um avanço significativo na forma de obtenção desses dados, com certeza para a melhoria da qualidade e desempenho desses materiais em diversas áreas do conhecimento.

REFERÊNCIAS

- ALI, S. et al. Parallel image processing techniques and applications: A review. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, v. 147, p. 91-108, 2021.
- BENNETT, J. et al. **Flow Properties of Powders and Bulk Solids. In: Handbook of Powder Technology**, v. 11, 2^a ed., Elsevier, 2002.
- BENNETT, J. et al. Flow Properties of Powders and Bulk Solids. In: *Handbook of Powder Technology*, v. 11, 2^a ed., Elsevier, 2002
- CARRASCO, F.; DOMÍNGUEZ, J. M.; GÓMEZ-GESTEIRA, M. Granular material flow through a sluice gate: A comparison between DEM simulations and experimental results. *Powder Technology*, v. 225, p. 89-102, 2012.
- CENEDESE, F., LIMA, F., NUNES, A. **Formatos de Imagem**. UFSM - CTISM. 2020.
- CHEN, Y. et al. Advances in food particle engineering: A review. *Trends in Food Science & Technology*, v. 88, p. 505-519, 2019.
- CHERNYAK, Victoria et al. Liver Imaging Reporting and Data System (LI-RADS) version 2018: imaging of hepatocellular carcinoma in at-risk patients. *Radiology*, v. 289, n. 3, p. 816-830, 2018.
- CHU, Y., QIAN, Y., WANG, H., et al. **Design and Implementation of a Low-Latency Multi-Platform Camera System for Underwater Stereo Image Acquisition**. *IEEE Access*, v. 9, 2021, p. 58323-58333.
- CRÓSTA, A.P., 1992. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Ed. Campinas, SP. IG/UNICAMP.
- DAVIS, M., et al. **Fundamentals of Chemical Reaction Engineering**. Nova Jersey: Prentice Hall, 2009.
- DRAPER, N.R.; SMITH, H. *Applied Regression Analysis*. 3. ed. New York: Wiley, 1998.
- DRAPER, Norman R.; SMITH, Harry. **Applied regression analysis**. John Wiley & Sons, 1998.
- ELMER, S., HECKEL, R., MOSS, T., et al. Visualization of high-dimensional data sets: A comparison between classical and modern techniques. *Computers & Graphics*, v. 81, p. 7-17, 2019.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento digital de imagens**. São Paulo: Edgard Blucher, 2018.

- HARALICK, Robert M. et al. **Computer and robot vision**. Reading: Addison-wesley, 1992.
- HENTATI, Y., BENGUEDDACH, A., GHEZEL-AHMED, H. Automatic Image Compression using Wavelet Transform and Lempel-Ziv-Welch Algorithm. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, v. 30, n. 3, 2021.
- HUMPHREY, J. A. **Powder and Bulk Solids Handling Processes: Basic Principles**. Springer, 2002.
- HUMPHREY, J. A. *Powder and Bulk Solids Handling Processes: Basic Principles*. Springer, 2002.
- ISRAELACHVILI, J. N. Intermolecular and surface forces. 3. ed. **Amsterdam: Academic Press**, 2011.
- JAEGER, J. C., COOK, N. G. W., & ZIMMERMAN, R. W. (2007). **Fundamentals of rock mechanics**. Blackwell Publishing.
- JAIN, A. K., Murty, M. N., & Flynn, P. J. (1995). Data clustering: A review. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 31(3), 264-323.
- JENIKE, A. W. **Storage and Flow of Solids**. *Bulletin of the University of Utah Engineering Experiment Station*, n. 123, 1964.
- Jl, J. et al. Preparation and characterization of drug-loaded polymer-coated magnetic nanoparticles for controlled drug release. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 16, n. 6, p. 2426, 2014.
- KARIUKI, W.I., Freireich, B., Smith, R.M., Rhodes, M. and Hapgood, K.P., 2013. Distribution nucleation: Quantifying liquid distribution on the particle surface using the dimensionless particle coating number. *Chemical engineering science*, 92, pp.134-145
- KNIGHT, J. B., JAEGER, H. M., & NAGEL, S. R. (1993). **Vibration-induced size separation in granular media: The convection connection**. *Physical Review Letters*, 70(24), 3728-3731.
- KOUTROUMBAS, Konstantinos; THEODORIDIS, Sergios. **Pattern recognition**. Academic Press, 2008.
- KUHLMANN-WILSDORF, D., & NEUHAUS, F. (1971). Adhesion of solid spheres: theory of the pull-off force. *Journal of Colloid and Interface Science*, 36(1), 116-133.
- KUHN, M. R.; POWELL, M. S.; THORNTON, D. **The DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge**. *Chemical Engineering Science*, v. 166, p. 120-135, 2017.

- LEE, J. Y., JEON, J. C., CHO, J. Y., et al. Highly efficient and low-cost GIF animation using particle swarm optimization algorithm. **Multimedia Tools and Applications**, v. 78, n. 2, p. 2057-2071, 2019.
- LIAO, S., LIU, Z., WANG, X., et al. BM3D-BM3D: A New Two-Stage Image Denoising Algorithm. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 28, n. 5, p. 2514-2529, 2019.
- MATHWORKS. Computer Vision Toolbox. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/computer-vision.html>. Acesso em: 16 fev. 2023.
- MONTGOMERY, D.C.; PECK, E.A.; VNING, G.G. **Introduction to Linear Regression Analysis**. 5. ed. New York: Wiley, 2012.
- MÜLLER, R. H.; KECK, C. M.; KADLECOVA, S. **Spherical agglomerates of fine particles (microsponges) as innovative carriers for drugs and other agents**. In: DRUG DELIVERY SYSTEMS. Springer, 2002.
- OHNSON, K. L., KENDALL, K., & ROBERTS, A. D. (1971). Surface energy and the contact of elastic solids. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. **Mathematical and Physical Sciences**, 324(1558), 301-313.
- OLIVEIRA, R. E. **Caracterização de materiais granulares**. Universidade de São Paulo, 2015. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3142/tde-22062015-092622/>. Acesso em: 15 fev. 2023.
- SCHOWENGERDT, R.A. **Remote sensing: Models and methods for image processing**. Academic Press. 2007.
- SILVA, A. M. e cols. Caracterização de Propriedades de Fluxo de Materiais Granulares Utilizados em Processos Industriais. In: **Anais do XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2014**.
- SILVA, J. C. **Comportamento de materiais granulares**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2013. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9KHJCB/comportamento_de_materiais_granulares.pdf. Acesso em: 15 fev. 2023
- SMITH, J. M., et al. **Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics**. Nova Jersey: McGraw Hill, (1950): 584
- SURI, Jasjit S. et al. **Handbook of biomedical image analysis: segmentation models**, part B. Springer Science & Business Media, 2004.
- TAN, Y., Günthner, W.A., Stephan Kessler, S., Lu Zhang, L., 2017. **Sample similarity analysis of angles of repose based on experimental results for DEM calibration**. EPJ Web

Conference 140, Powders and Grains 2017 – 8th International Conference on Micromechanics on Granular Media

VAN DE GEIJN, R. A. A new era in linear algebra: The advent of multicore processors. **Computing in Science & Engineering**, v. 19, n. 1, p. 34-45, 2017.

VIPPAGUNTA, S. et al. Crystalline solids. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 60, n. 6, p. 585-601, 2008.

WANG, W. et al. Preparation and characterization of core-shell structured Fe₃O₄/PMMA magnetic nanocomposites. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 16, n. 2, p. 1-10, 2014.

YANG, L., et al. Flow regimes and particle mixing in a dense fluidized bed. **Chemical Engineering Science**, v. 194, p. 243-254, 2018.

YANG, L., et al. Flow regimes and particle mixing in a dense fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, v. 194, p. 243-254, 2018.

ZHOU, J., XIONG, X., CHENG, Z., et al. Deep Learning on Image Denoising: **An Overview**. **IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**, v. 30, n. 3, p. 713-728, 2020.

Apêndice 1

clc

clear all

```

IM = imread('A2.png');
imshow(IM);
mascara = createMask4(IM);
[B,L] = bwboundaries(mascara,'noholes')
stats = regionprops(L, 'Area');
qtd = sum([stats.Area] > 0) %padrão 50%
props = regionprops('table',mascara,'area')
areaPixal_Total = sum(props.Area)
imshow(IM);
title(sprintf('\fontsize{16}{Existem %d objetos selecionados nessa
imagem}', qtd));

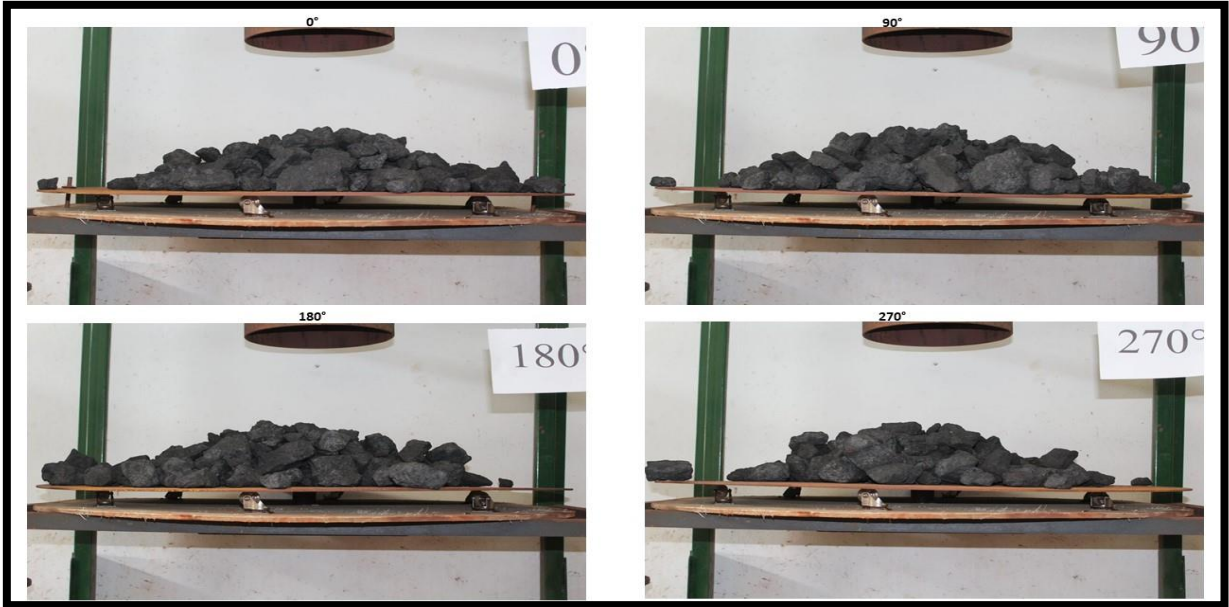
hold on
for k = 1:length(B)
    area = stats(k).Area;

    if area > 0 %padrão 50%
        boundary = B{k};
        plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'black', 'LineWidth', 2);
        text(boundary(1,2), boundary(1,1), sprintf('%.0f',area),...
            'Color', 'white',...
            'FontSize', 12,...
            'FontWeight', 'bold',...
            'BackgroundColor', 'black');
    end
end
hold off

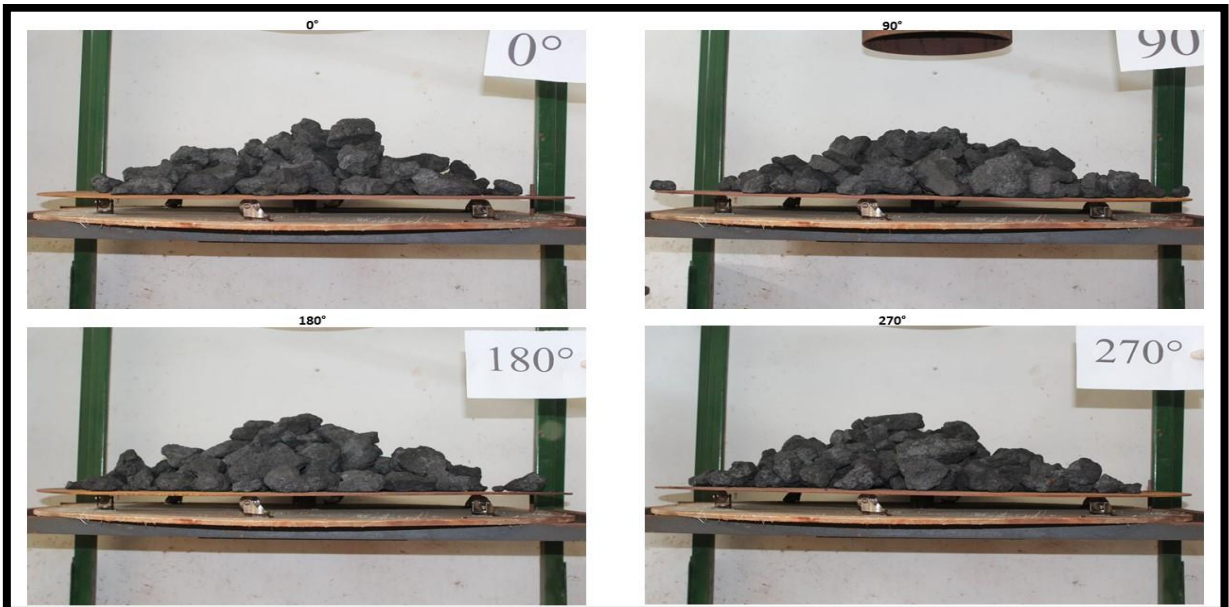
```

Apêndice 2

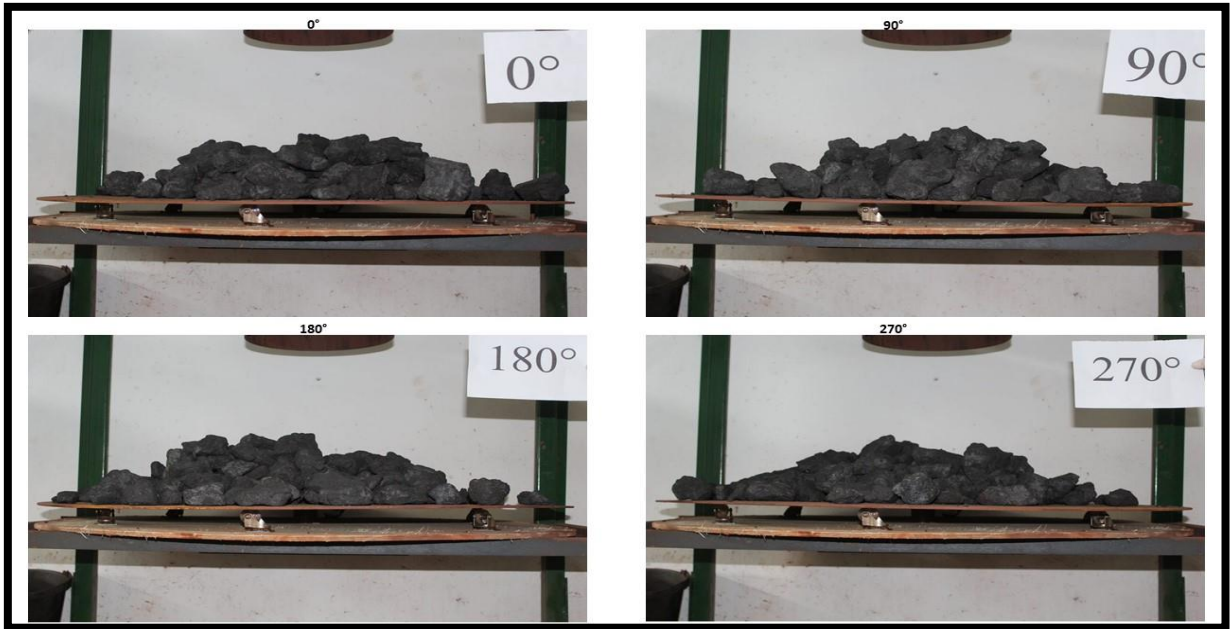
COQUE - Umidade 1,5%



Ensaio 1. Coque a 1,5%.

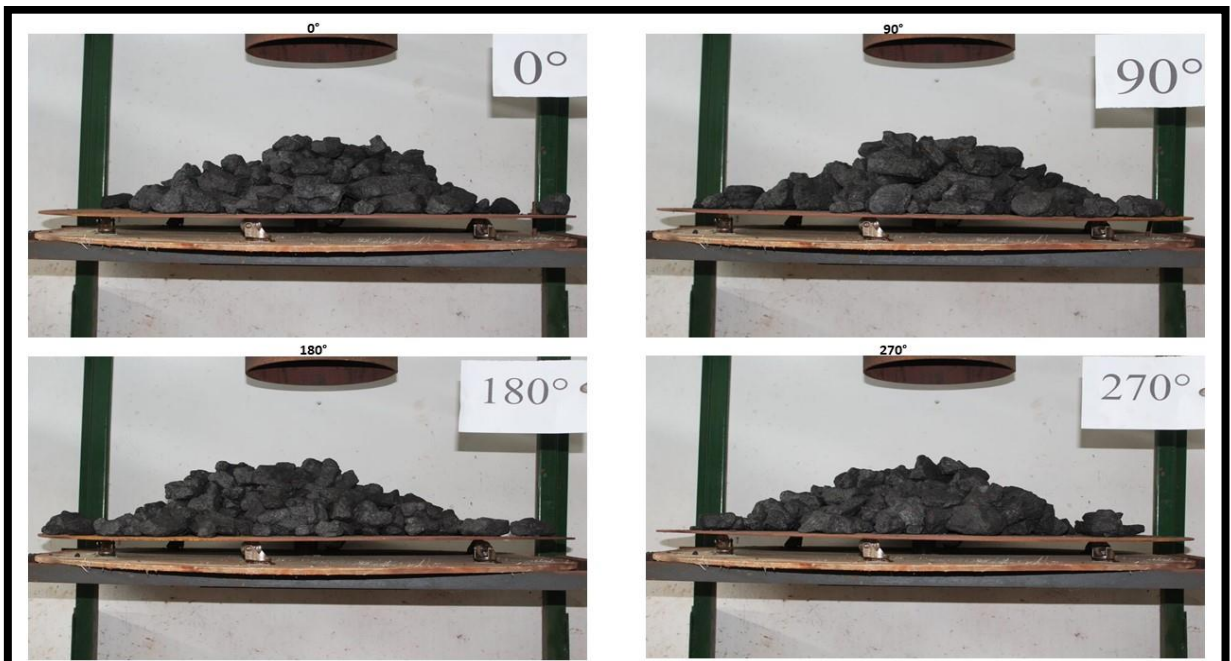


Ensaio 2. Coque a 1,5%.

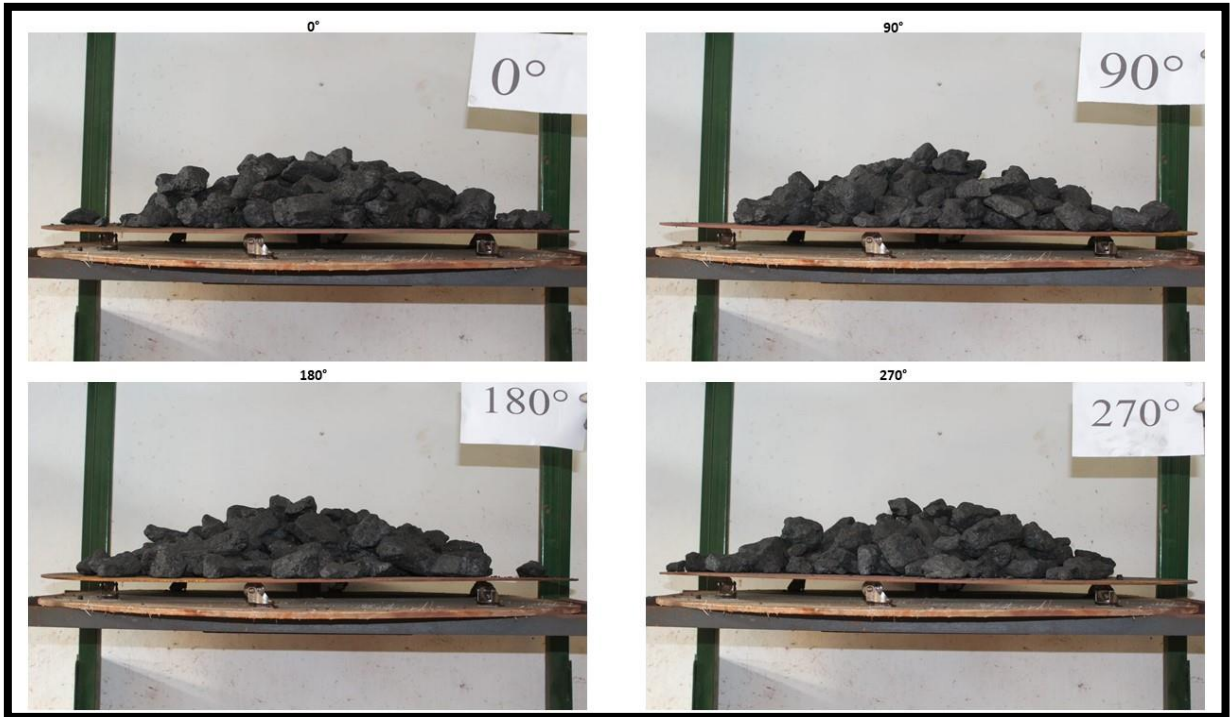


Ensaio 3. Coque 1,5%.

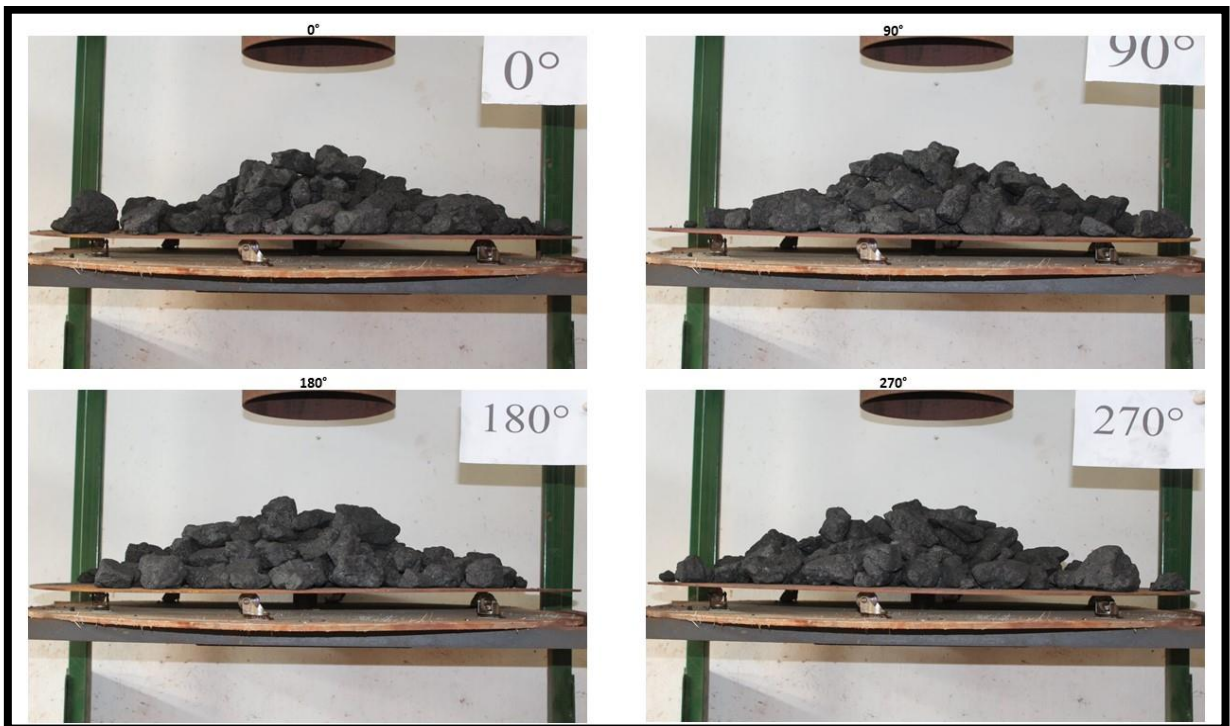
COQUE - Umidade 3,2%



Ensaio 1. Coque 3,2%.



Ensaio 2. Coque 3,2%.

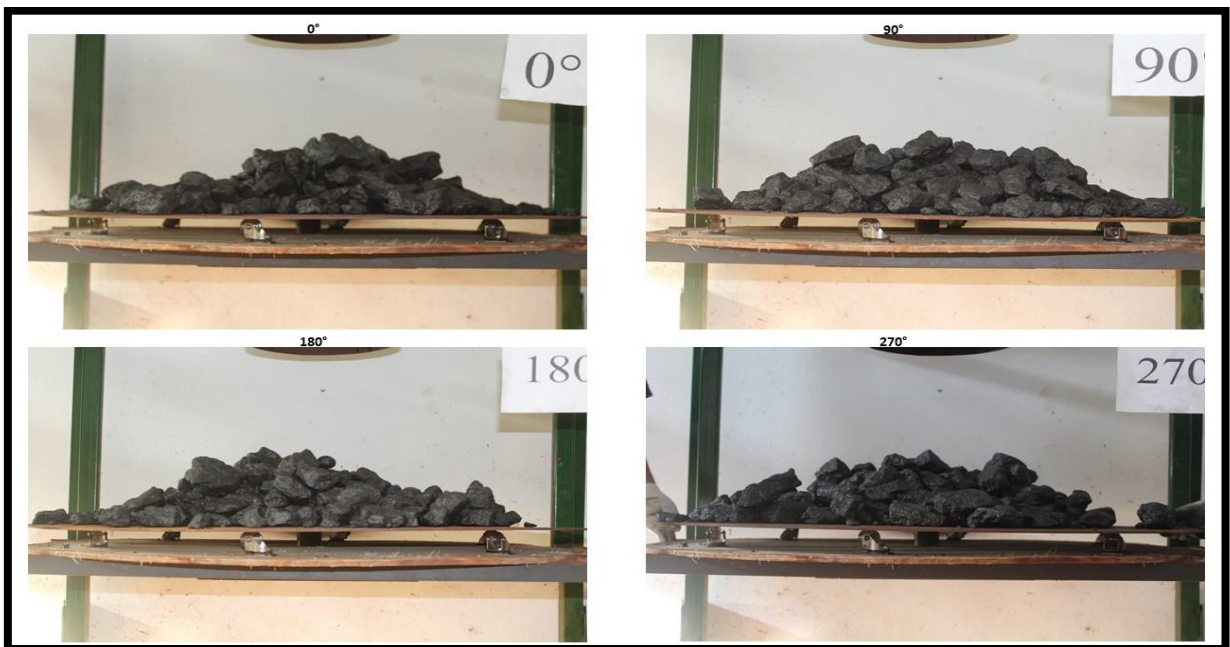


Ensaio 3. Coque 3,2%.

COQUE - Umidade 4,7%



Ensaio 1. Coque 4,7%.

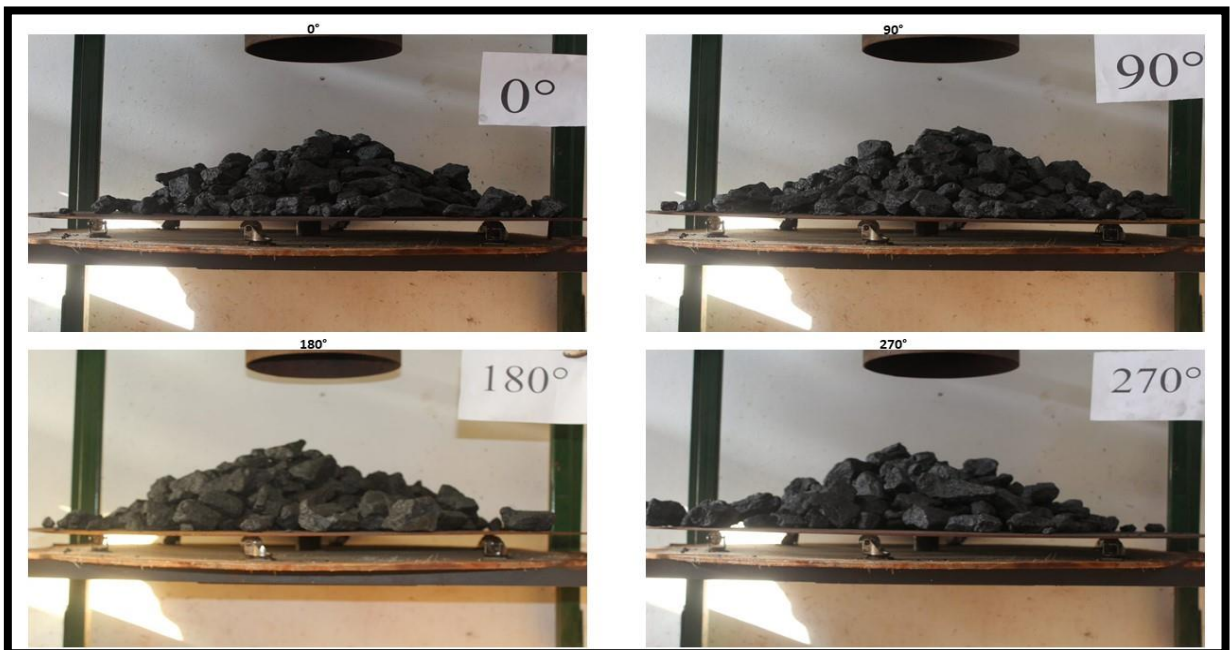


Ensaio 2. Coque 4,7%.

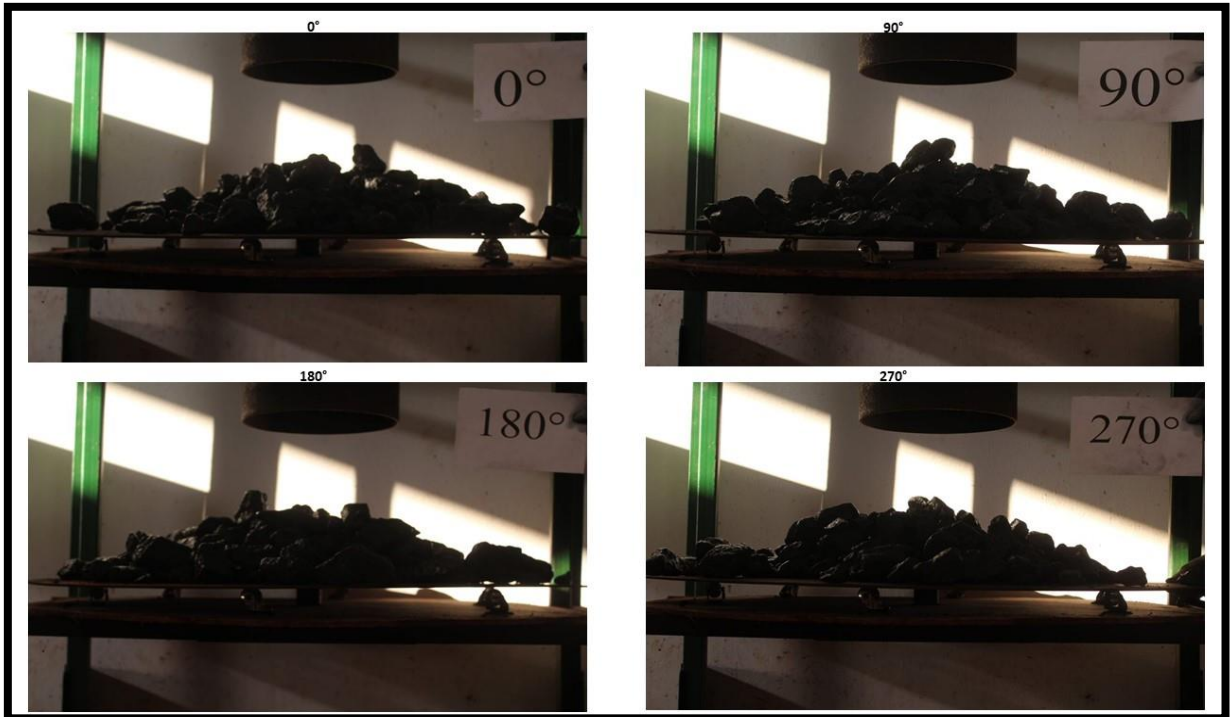


Ensaio 3. Coque 4,7%.

COQUE - Umidade 6,2%



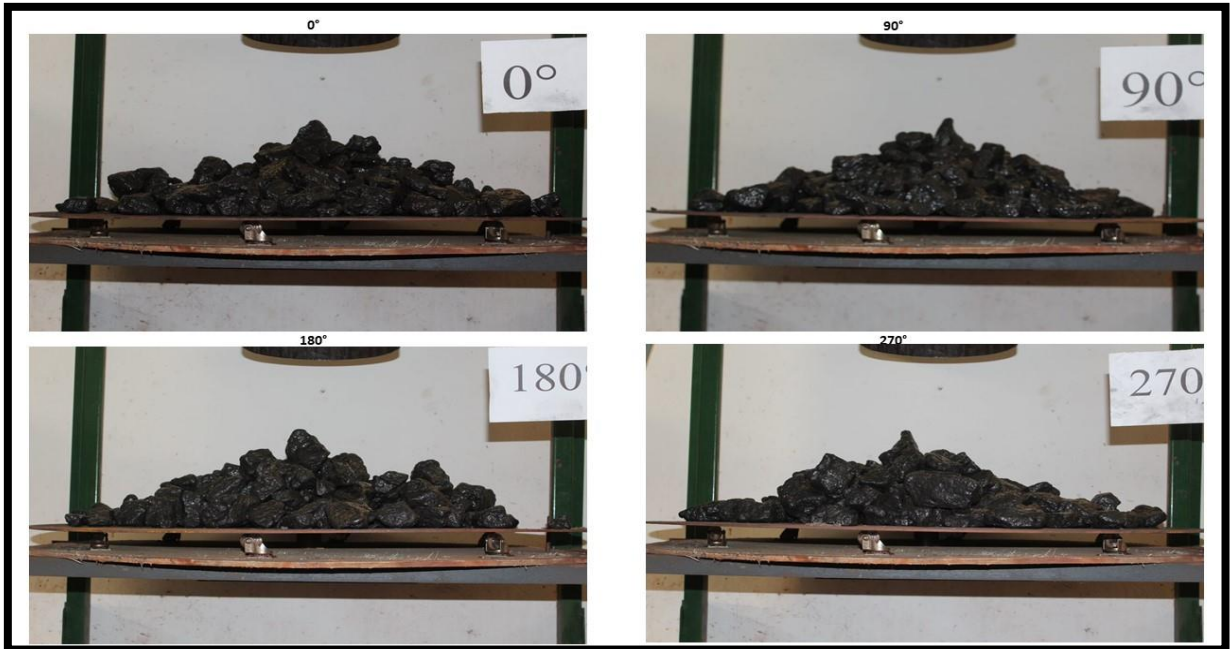
Ensaio 1. Coque 6,2%.



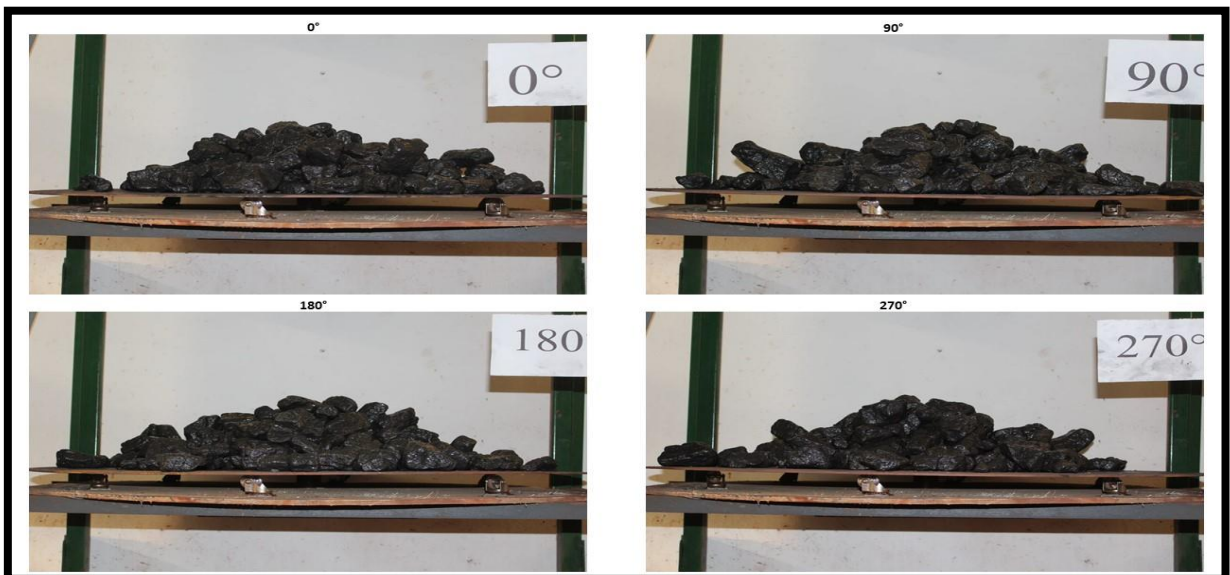
Ensaio 2. Coque 6,2%.



Ensaio 3. Coque 6,2%.

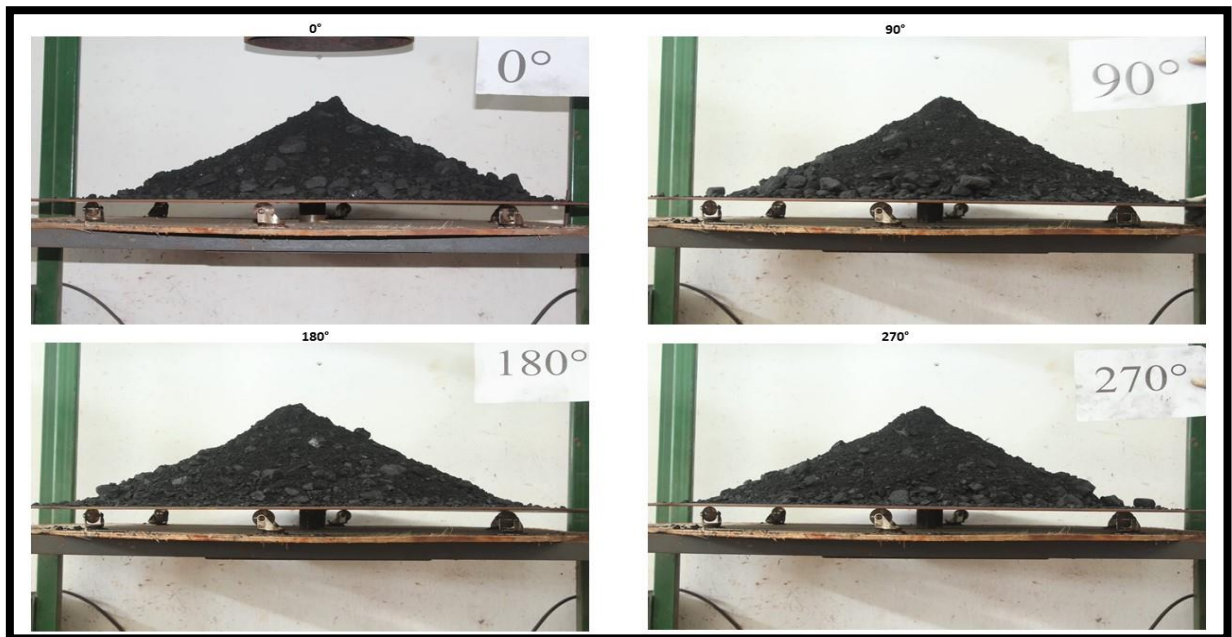


Ensaio 2. Coque 8,0%.

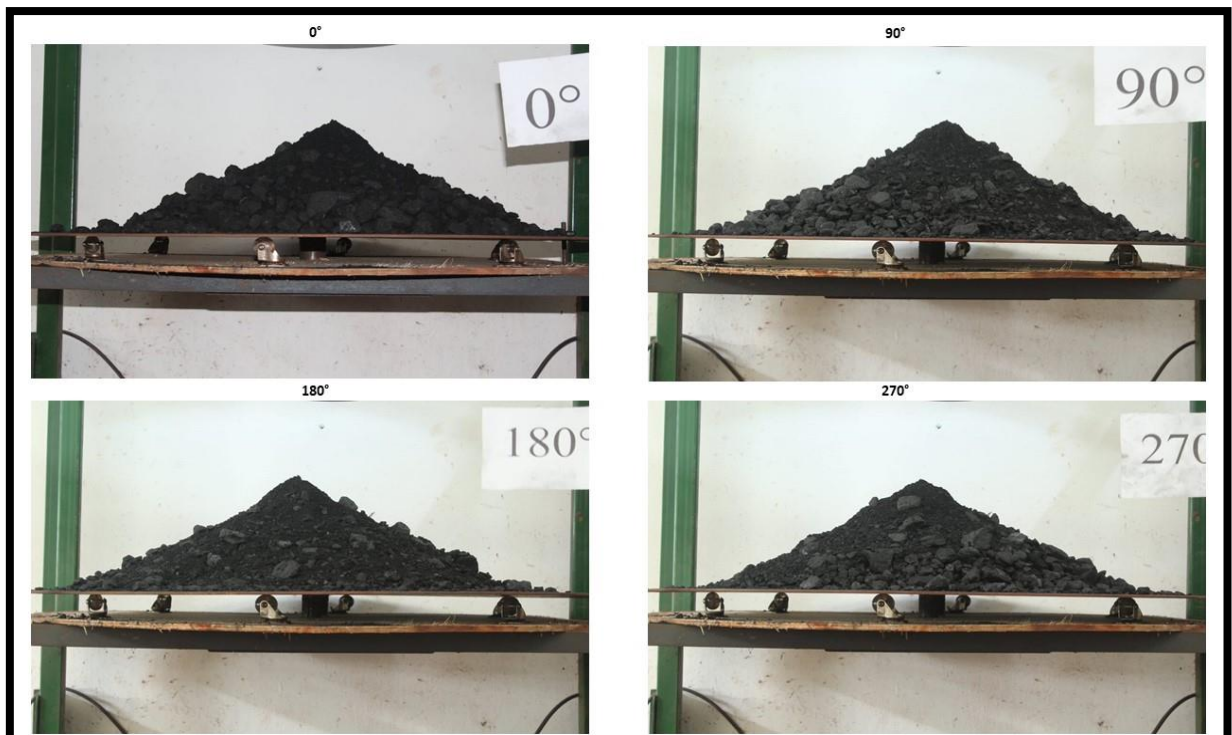


Ensaio 3. Coque 8,0%.

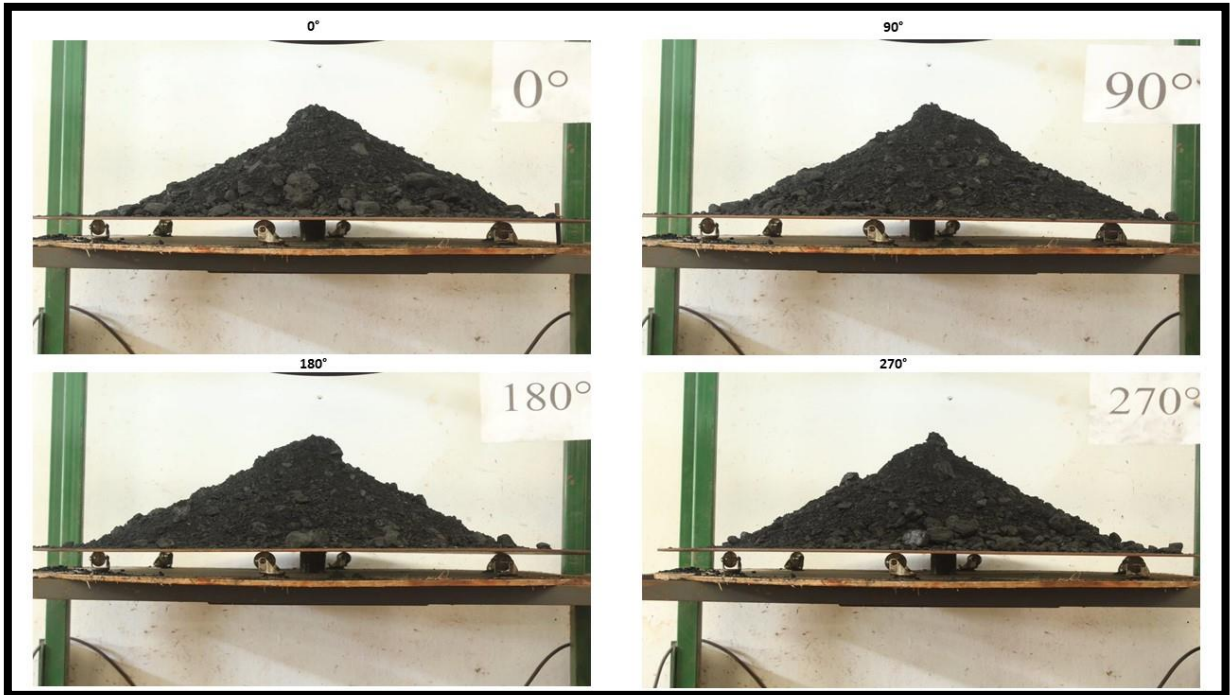
CARVÃO PCI - Umidade 5,0%



Ensaio 1. PCI 5,0%.

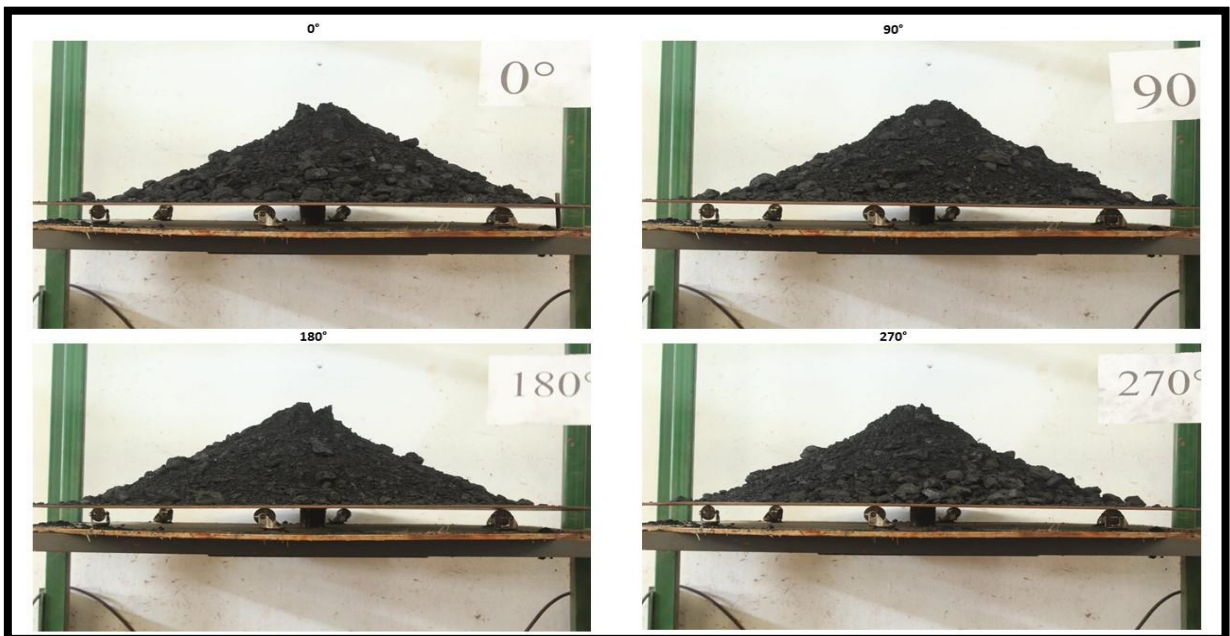


Ensaio 2. Carvão PCI a 5,0%.

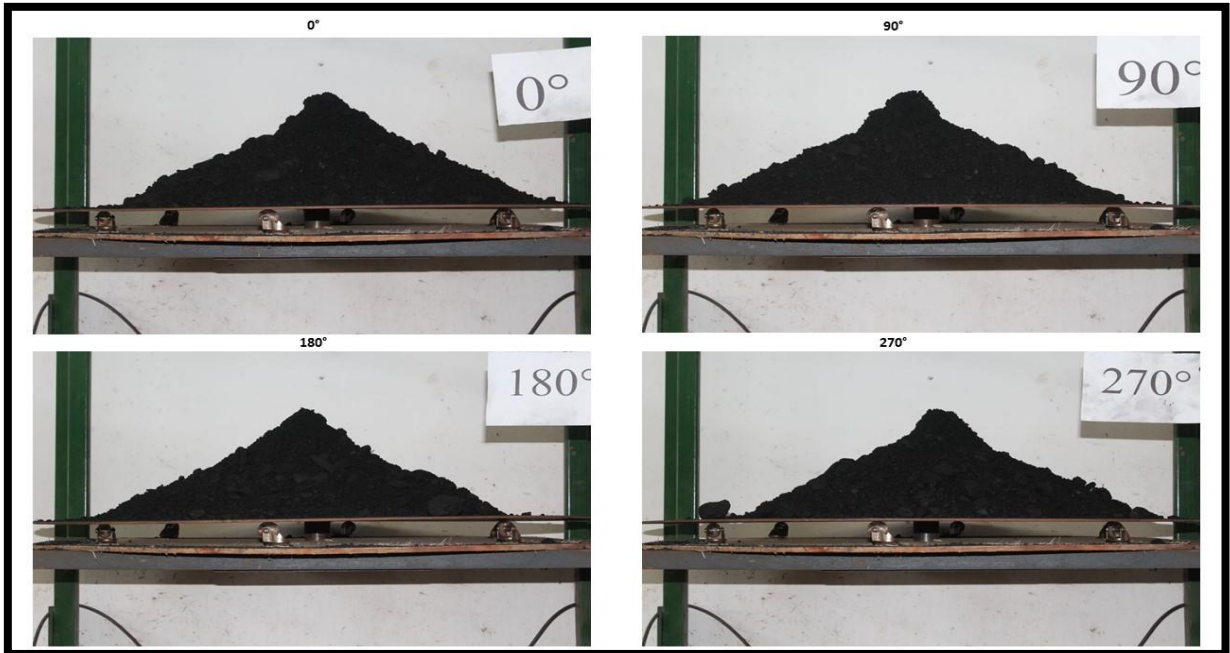


Ensaio 3. Carvão PCI a 5,0%.

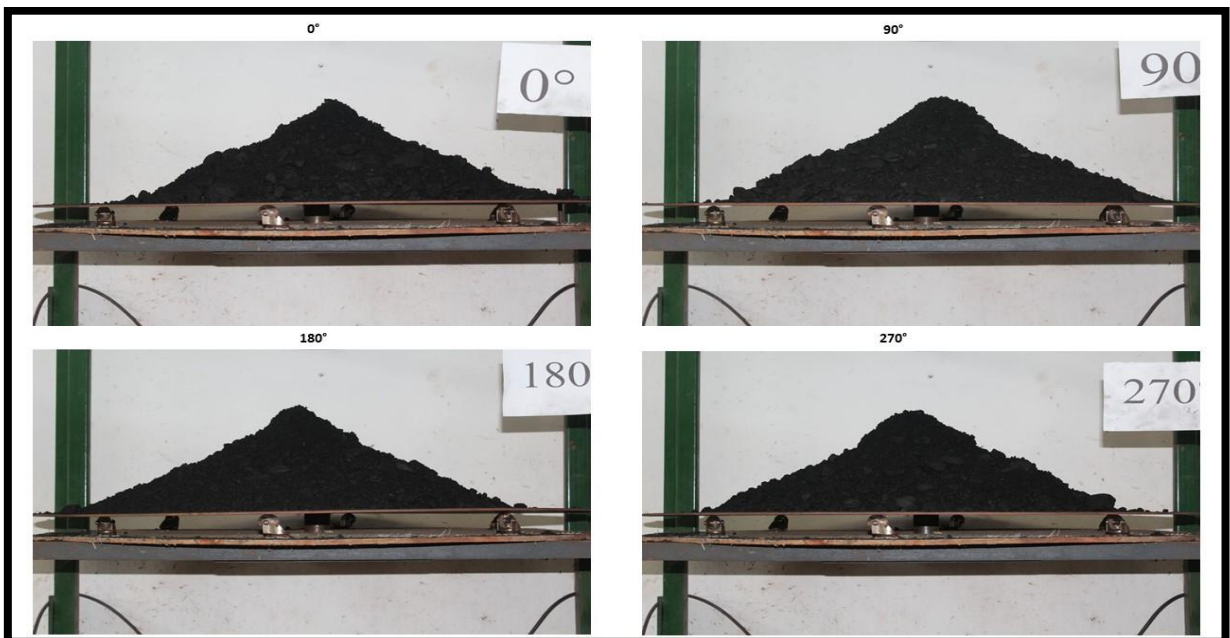
CARVÃO PCI - Umidade 6,2%



Ensaio 1. Carvão PCI a 6,2%.

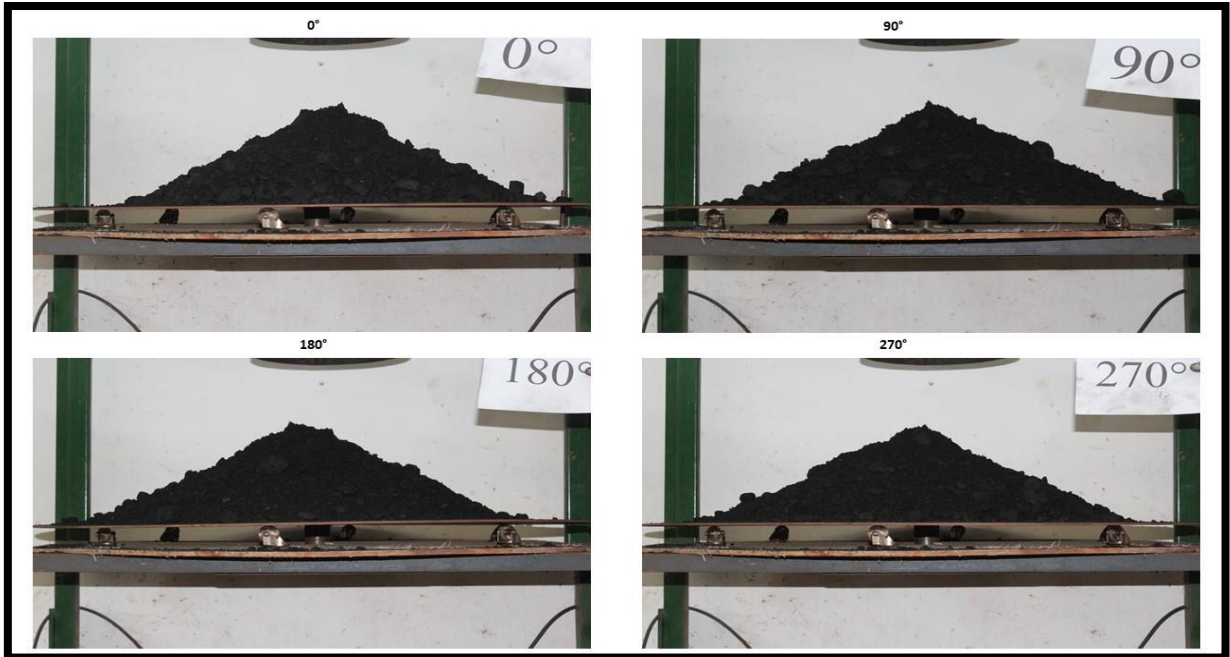


Ensaio 2. Carvão PCI a 6,2%.

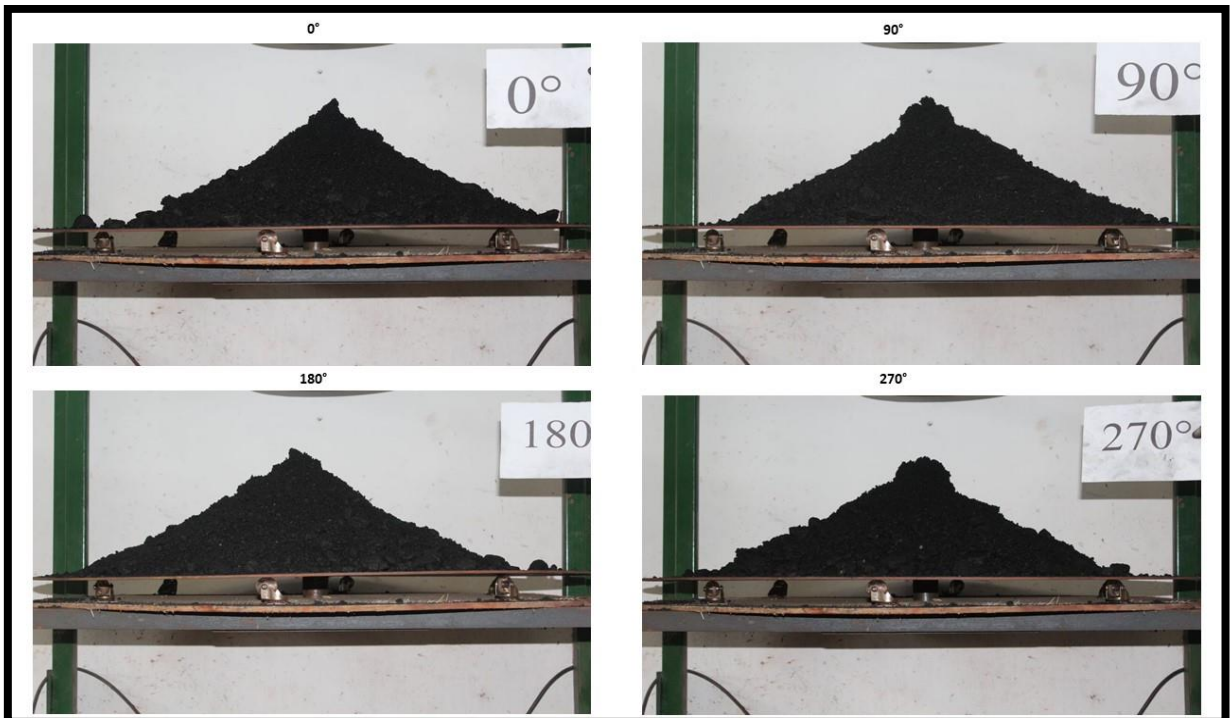


Ensaio 3. Carvão PCI a 6,2%.

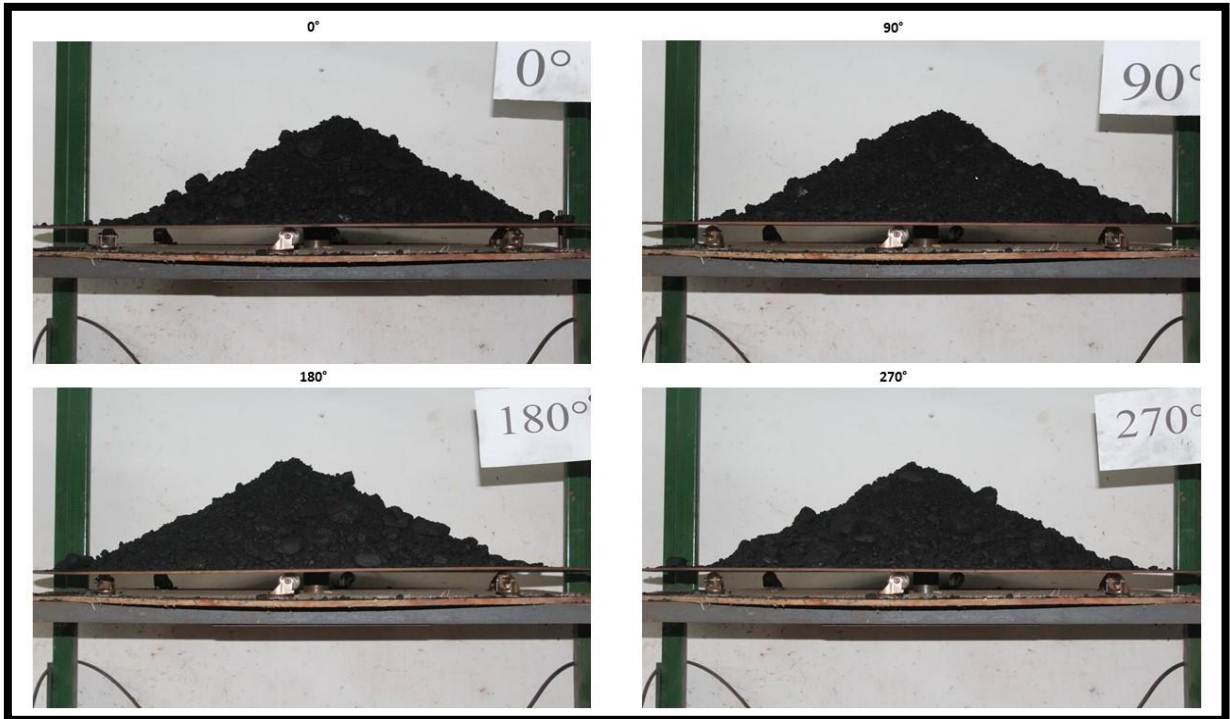
CARVÃO PCI - Umidade 7,4%



Ensaio 1. Carvão PCI a 7,4%.

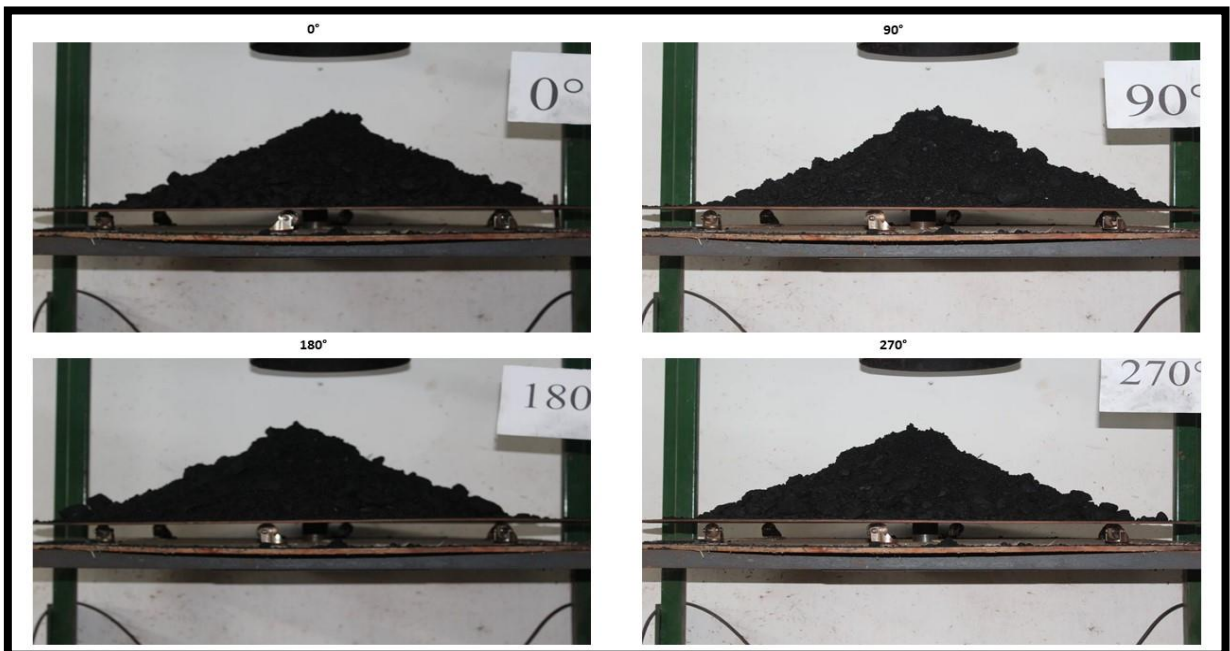


Ensaio 2. Carvão PCI a 7,4%.

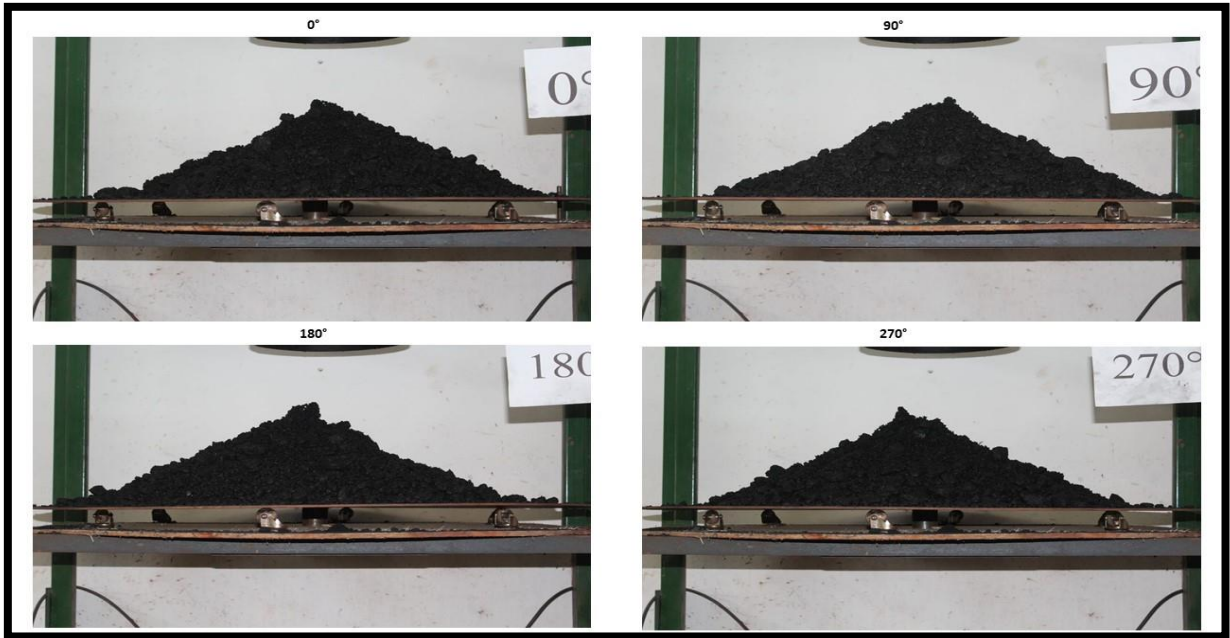


Ensaio 3. Carvão PCI a 7,4%.

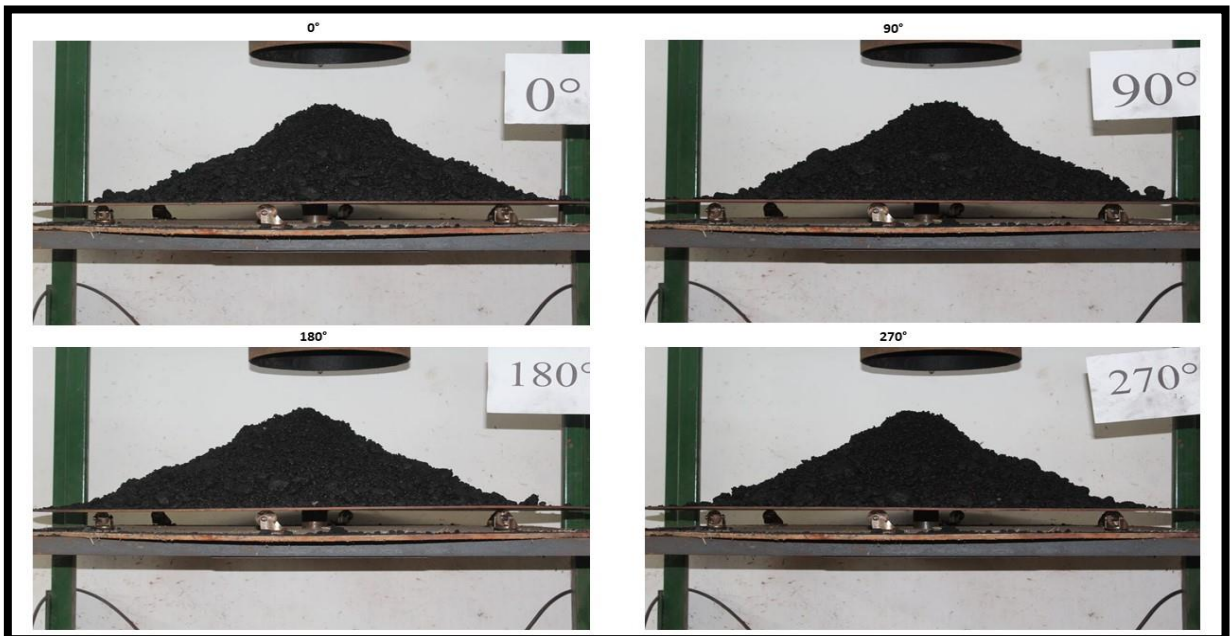
CARVÃO PCI - Umidade 8,6%



Ensaio 1. Carvão PCI a 8,6%.

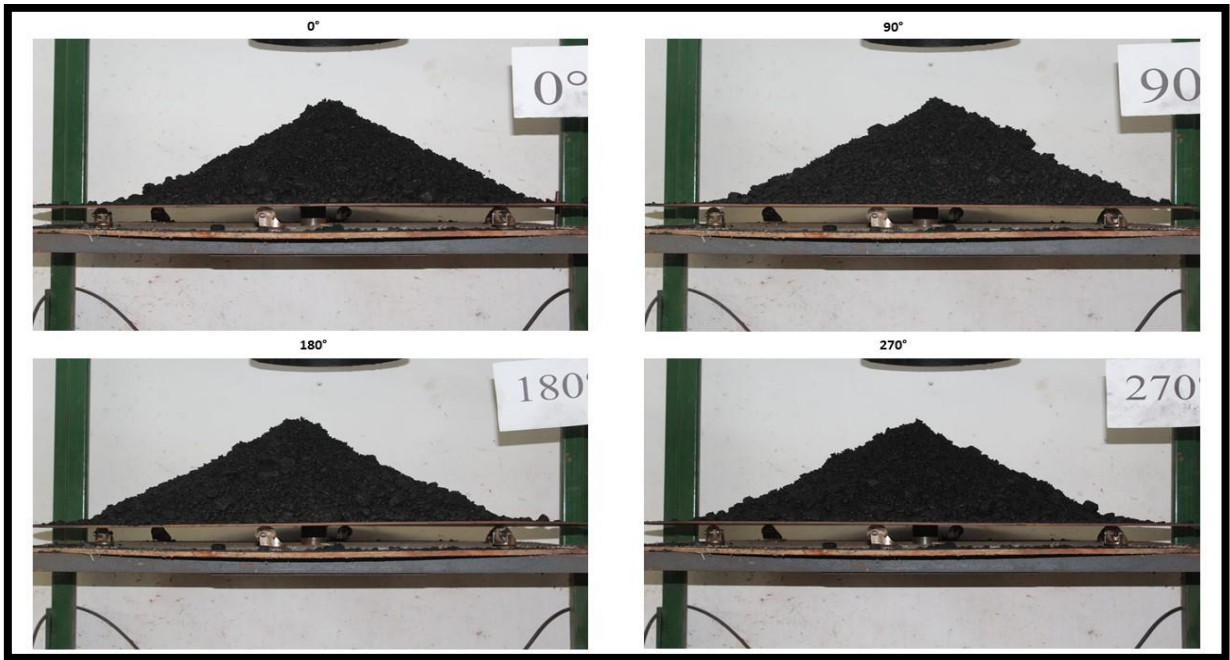


Ensaio 2. Carvão PCI a 8,6%.

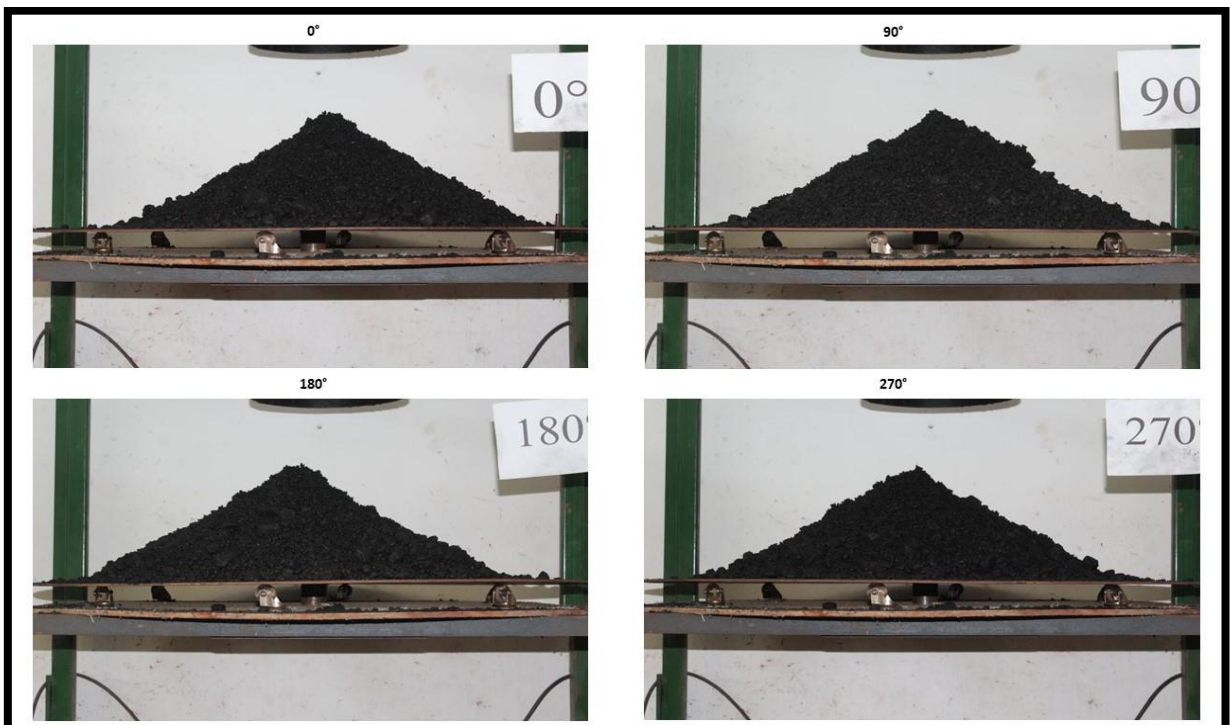


Ensaio 3. Carvão PCI a 8,6%.

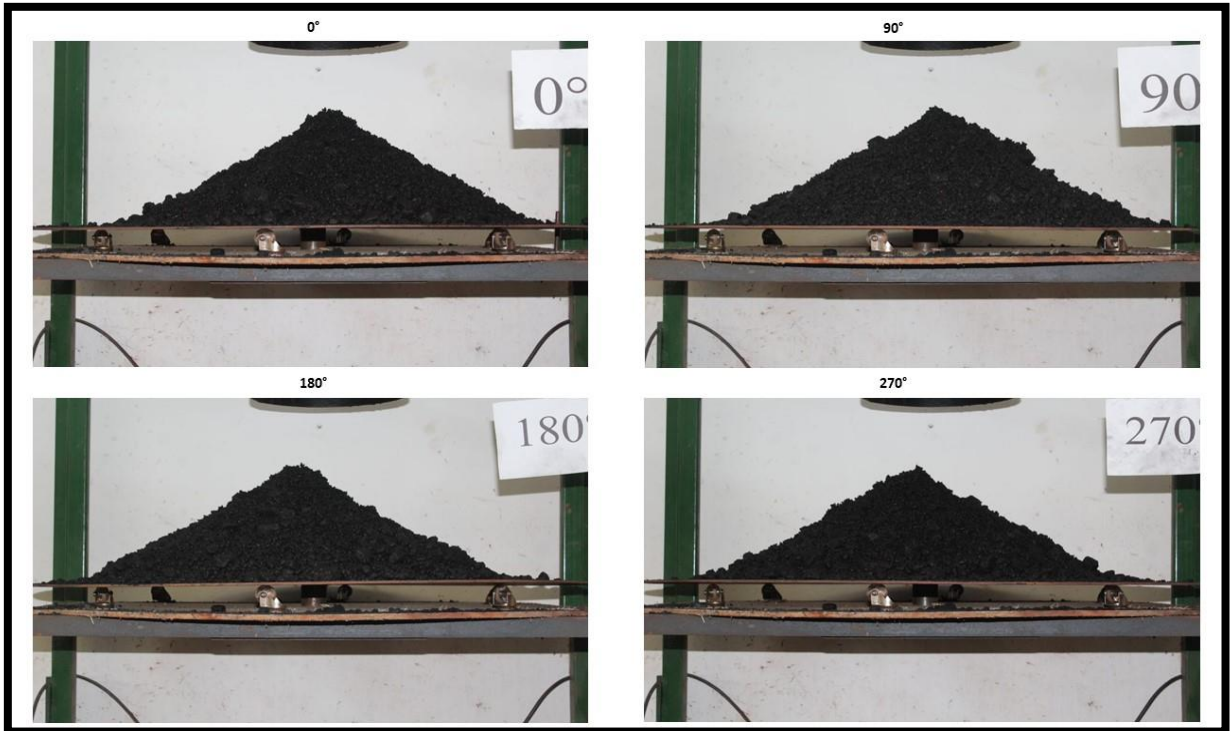
CARVÃO PCI - Umidade 10.0%



Ensaio 1. Carvão PCI a 10,0%.

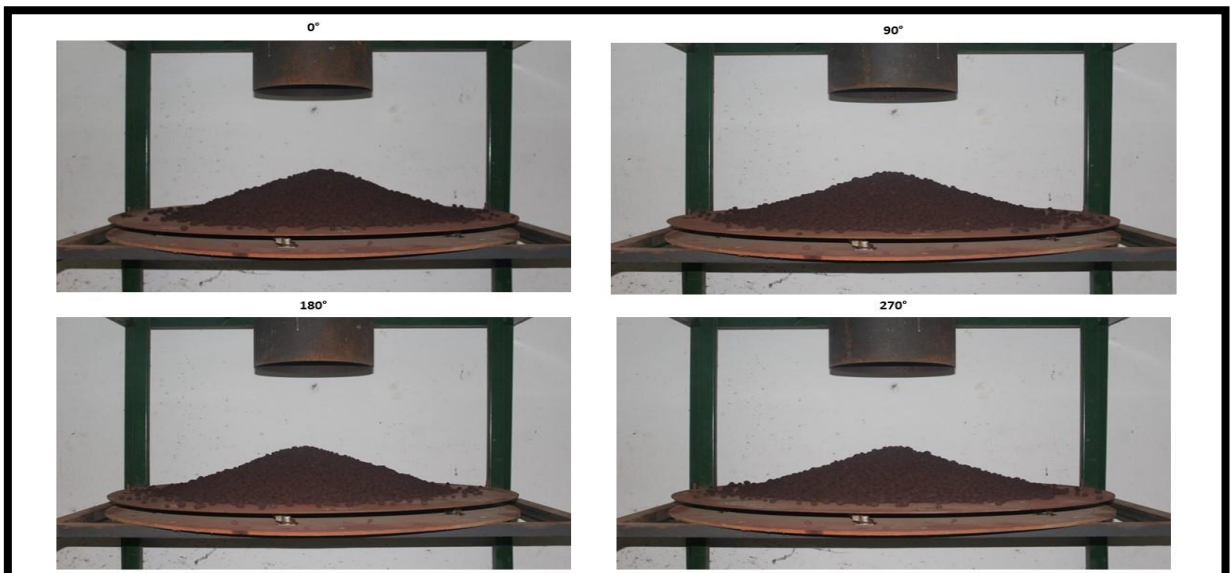


Ensaio 2. Carvão PCI a 10,0%.

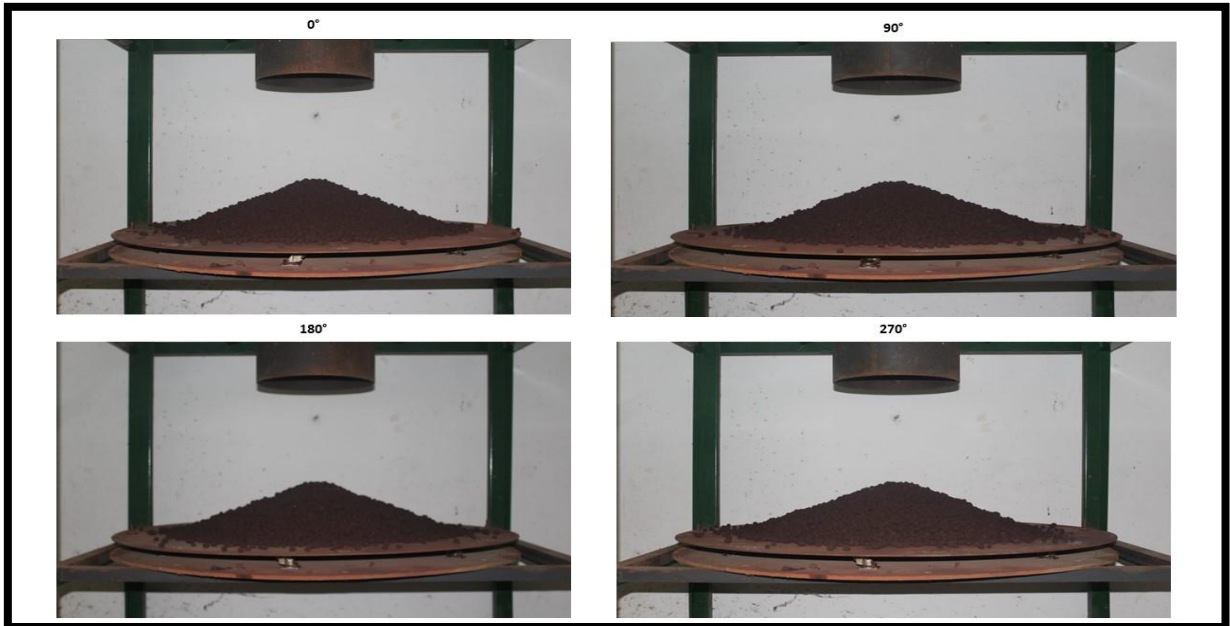


Ensaio 3. Carvão PCI a 10,0%.

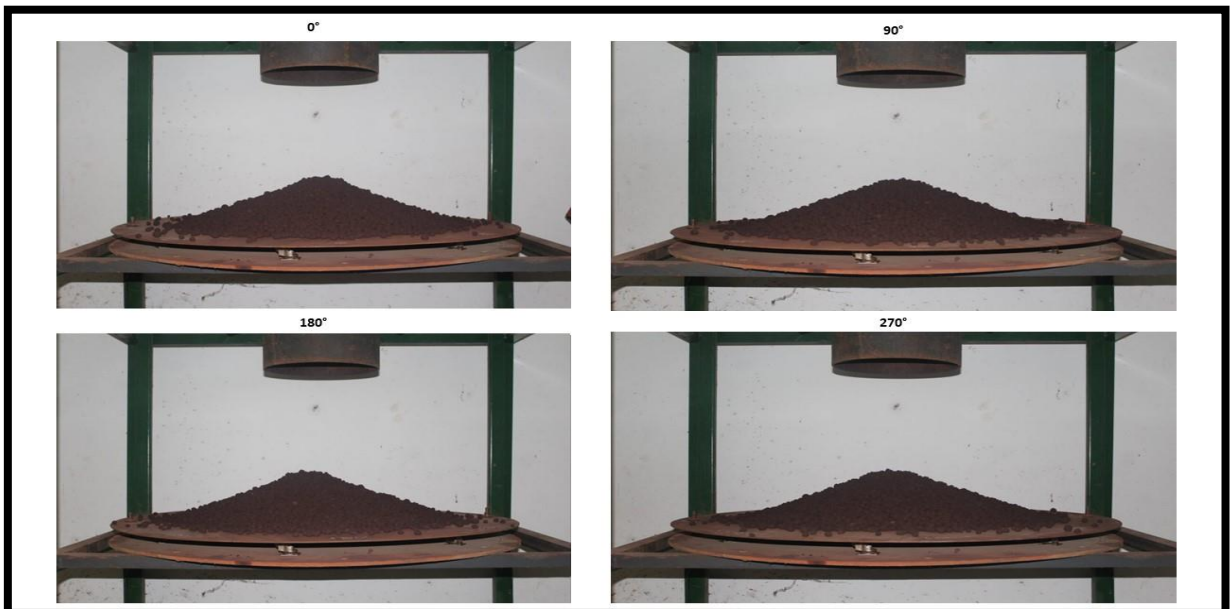
PELOTA - Umidade 1,5%



Ensaio 1. Pelota a 1,5%.

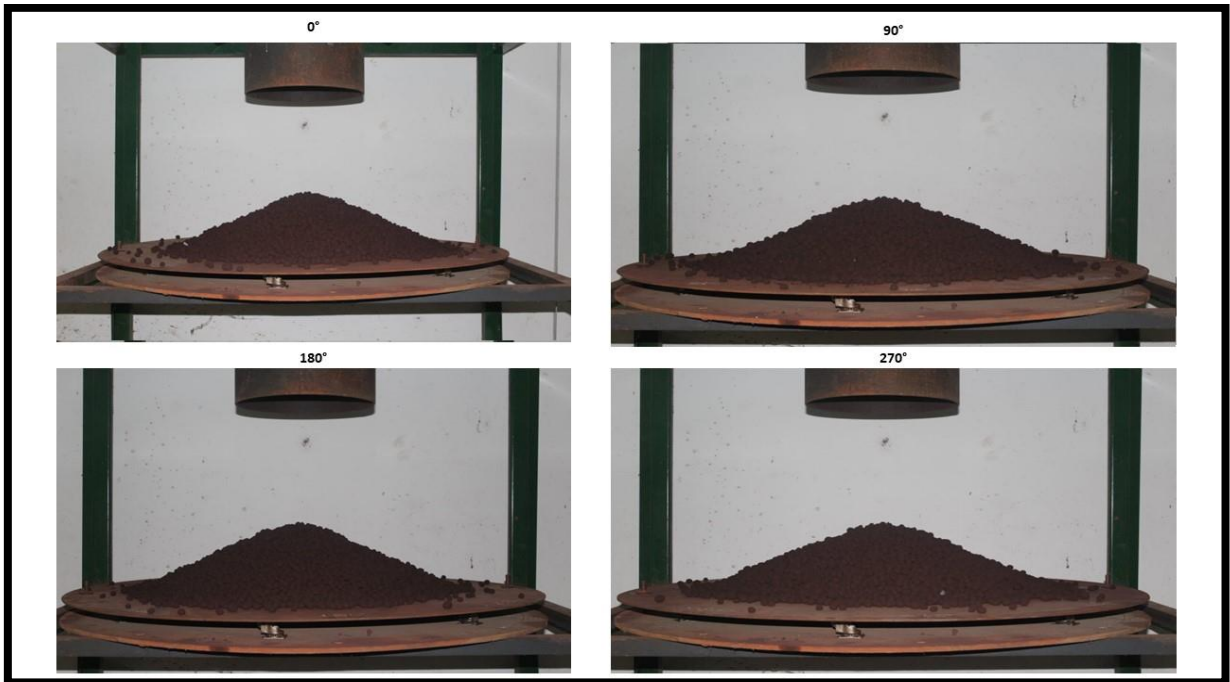


Ensaio 2. Pelota a 1,5%.

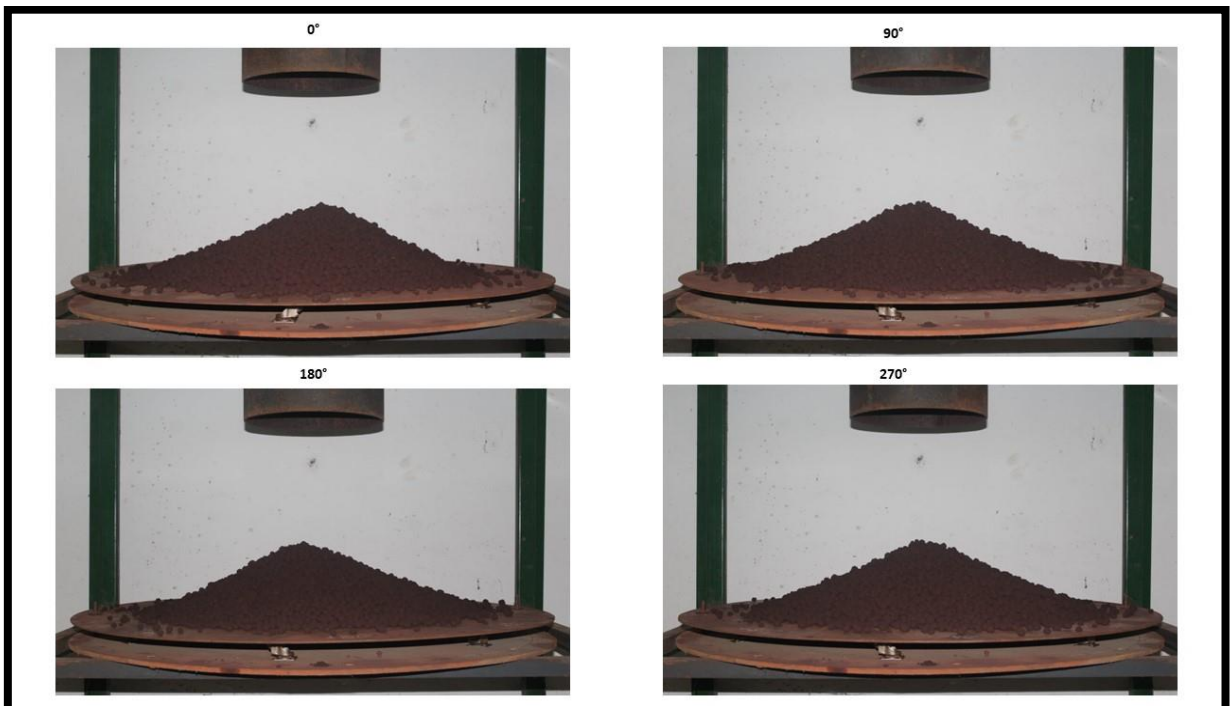


Ensaio 3. Pelota a 1,5%.

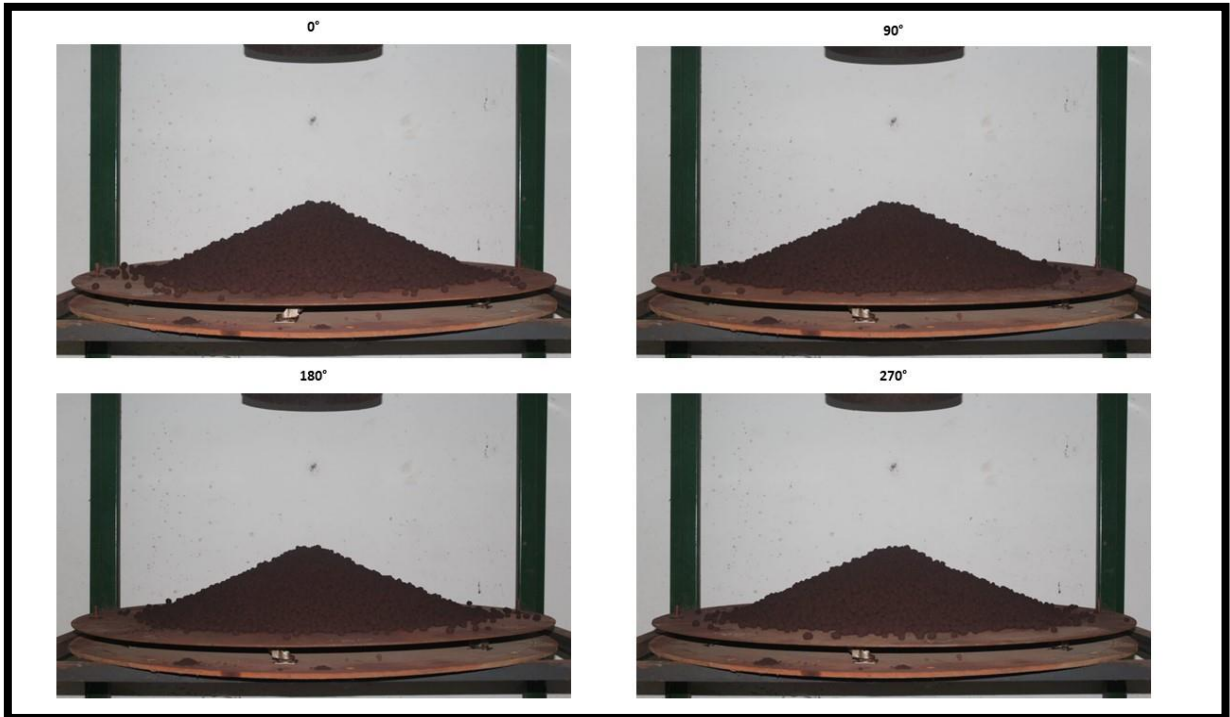
ELOTA - Umidade 2,5%



Ensaio 1. Pelota a 2,5%.

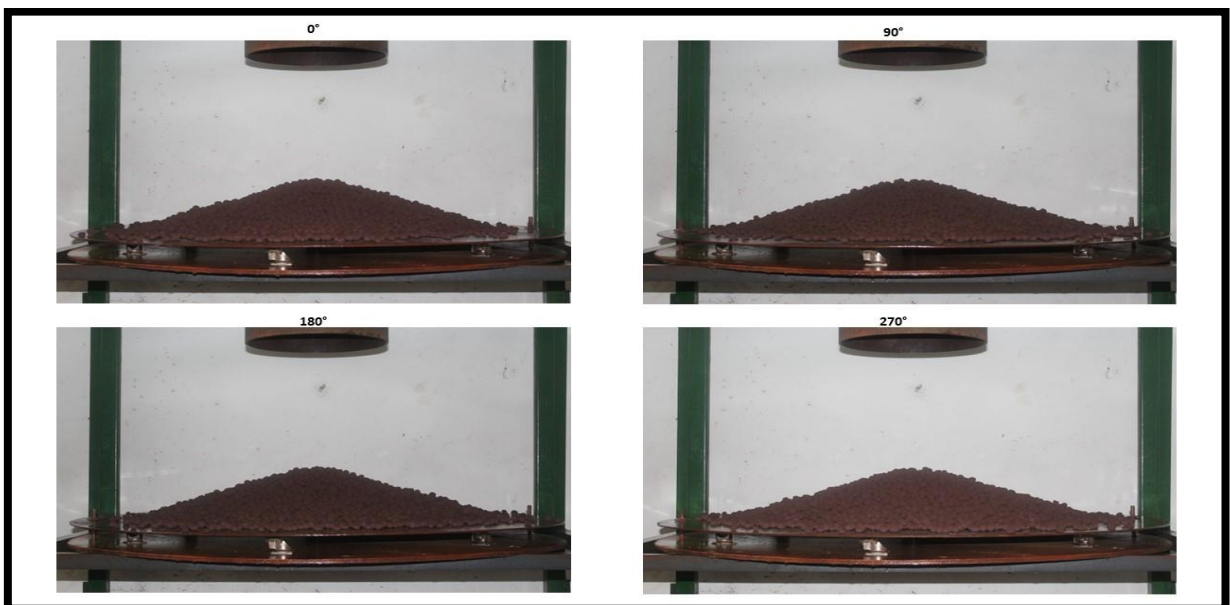


Ensaio 2. Pelota a 2,5%.

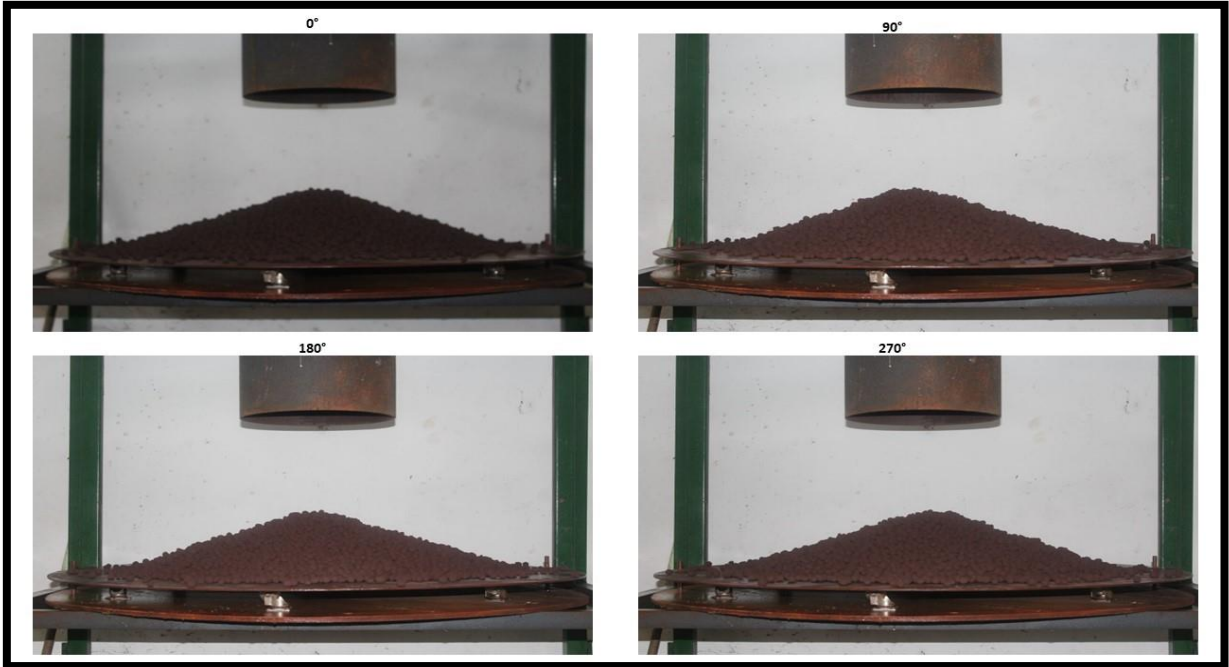


Ensaio 3. Pelota a 2,5%.

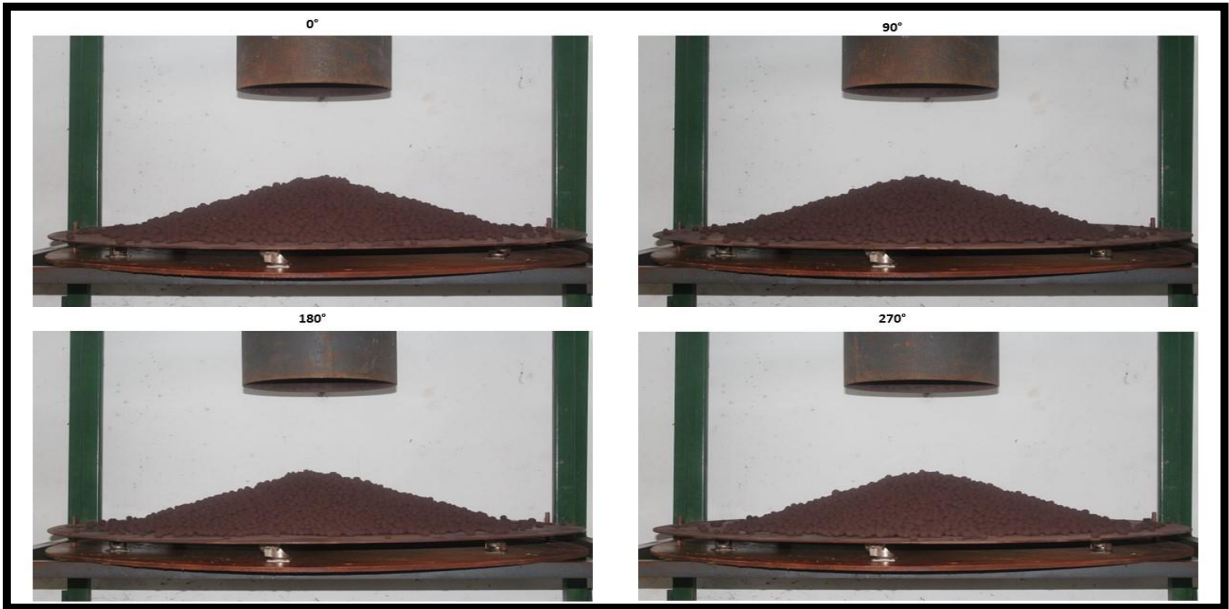
PELOTA - Umidade 3,5%



Ensaio 1. Pelota a 3,5%.

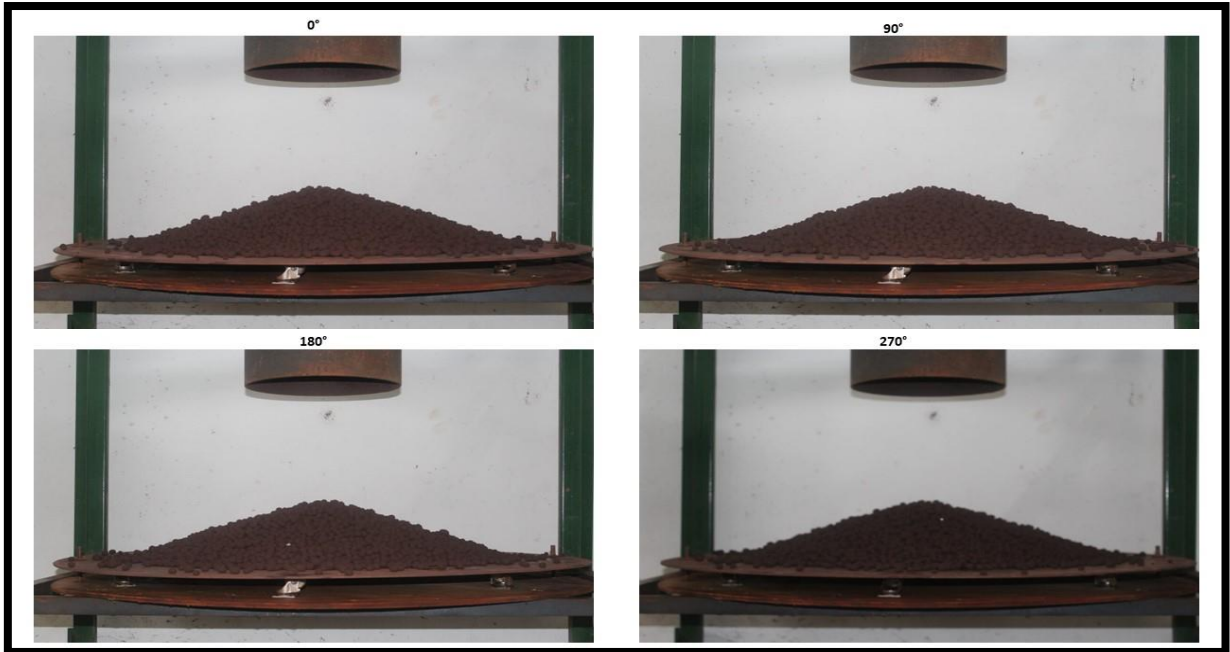


Ensaio 2. Pelota a 3,5%.

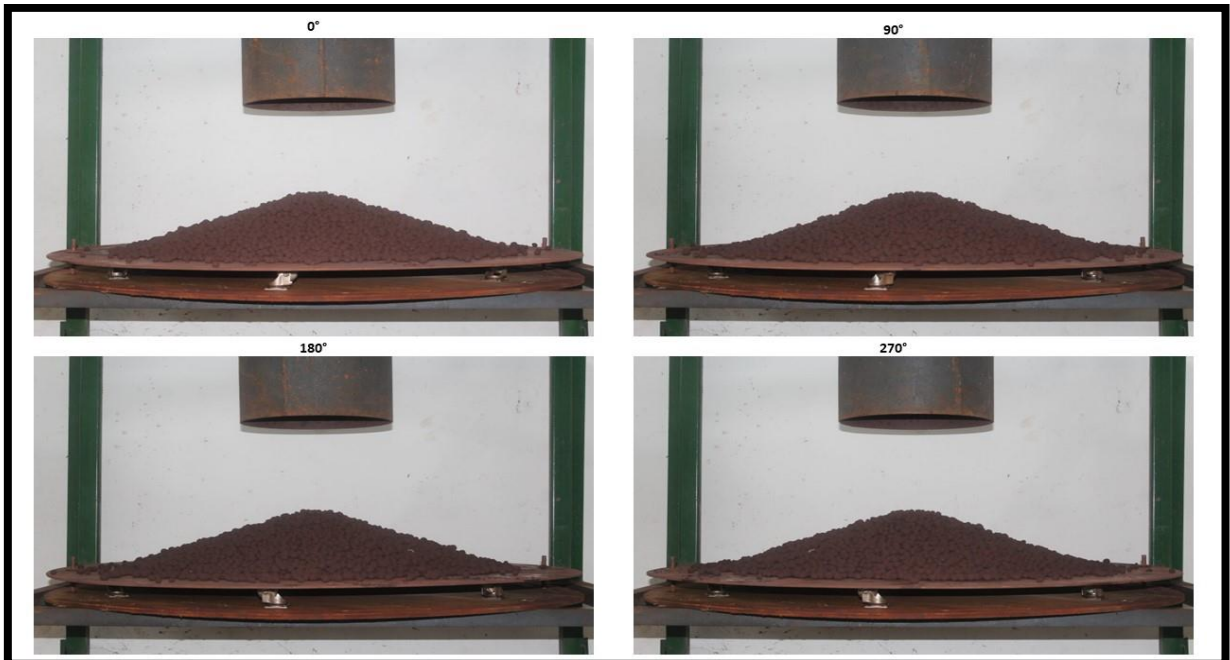


Ensaio 3. Pelota a 3,5%.

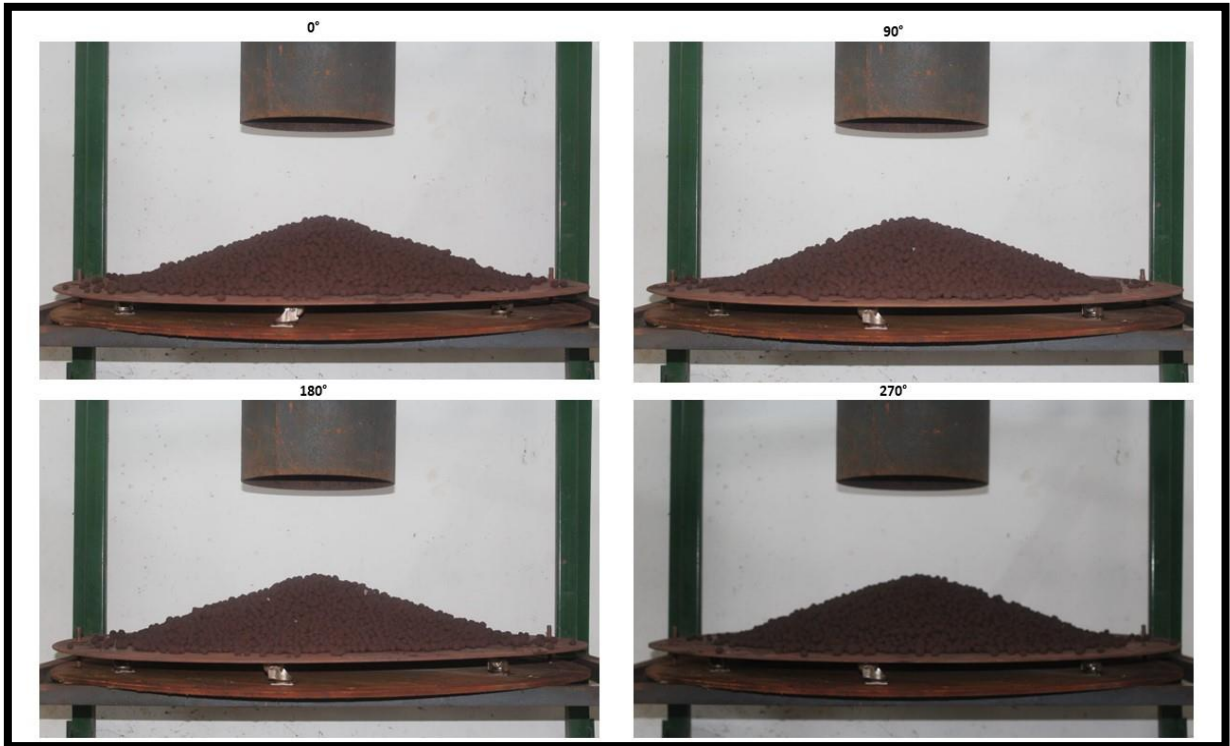
PELOTA - Umidade 4,5%



Ensaio 1. Pelota a 4,5%.

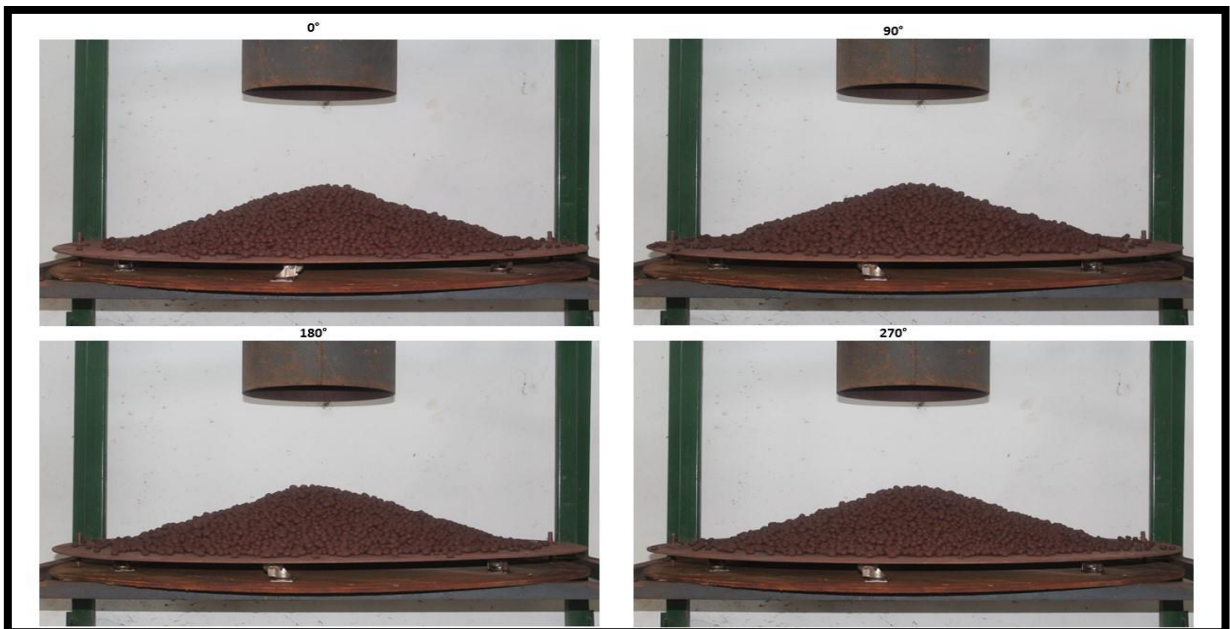


Ensaio 2 Pelota a 4,5%.

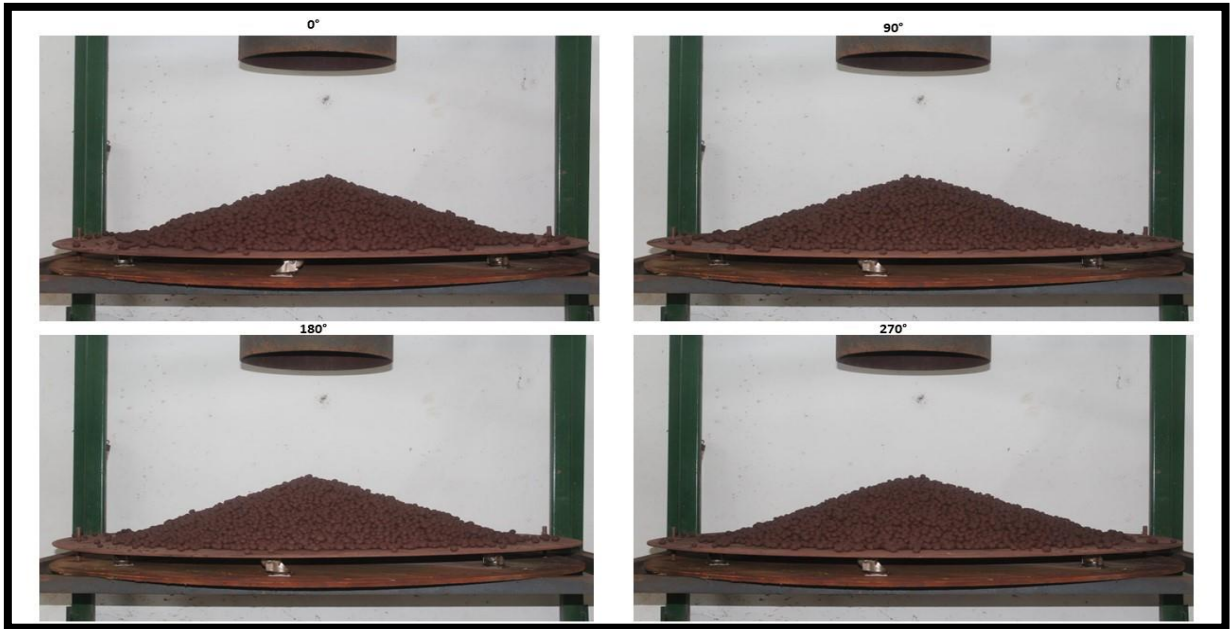


Ensaio 3. Pelota a 4,5%.

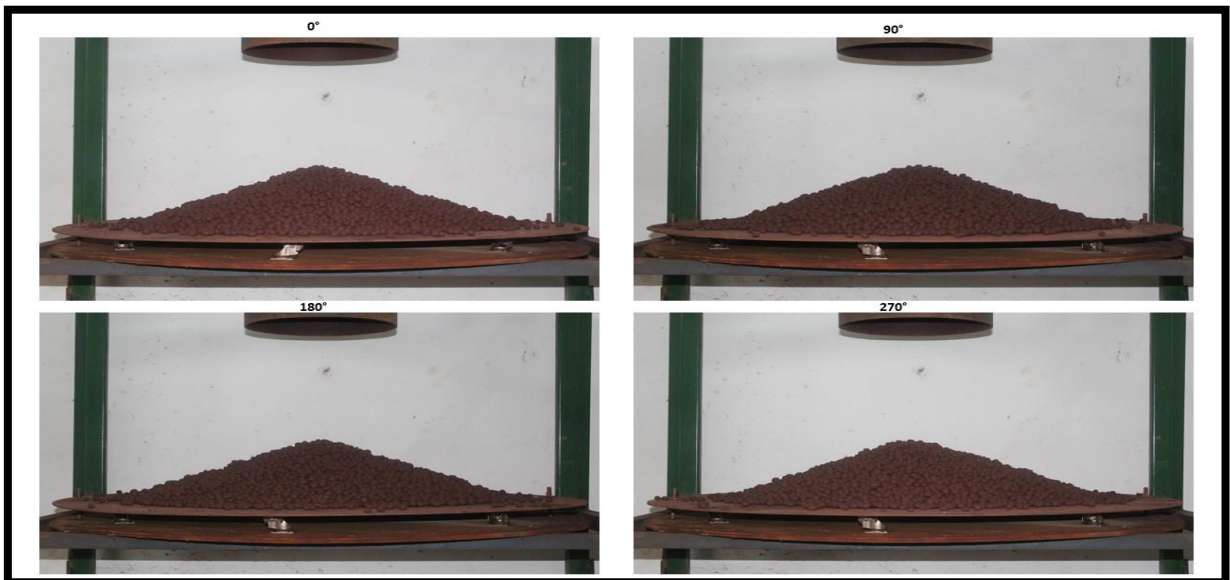
PELOTA - Umidade 5,5%



Ensaio 1. Pelota a 5,5%.

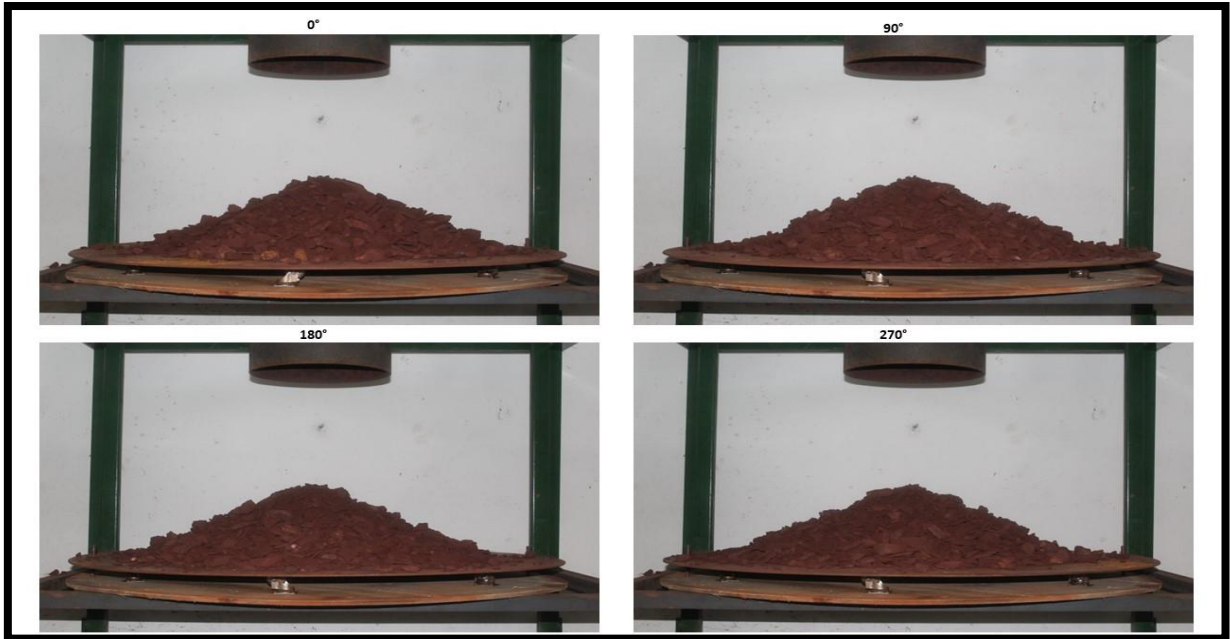


Ensaio 2. Pelota a 5,5%.

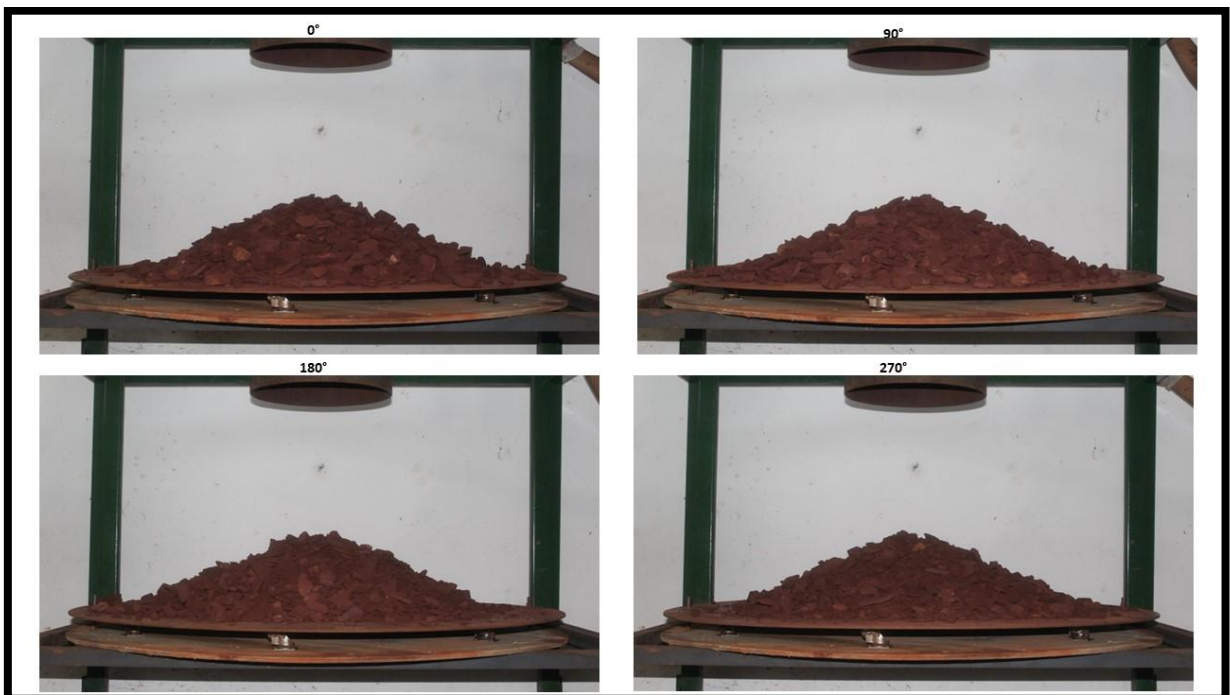


Ensaio 3. Pelota a 5,5%.

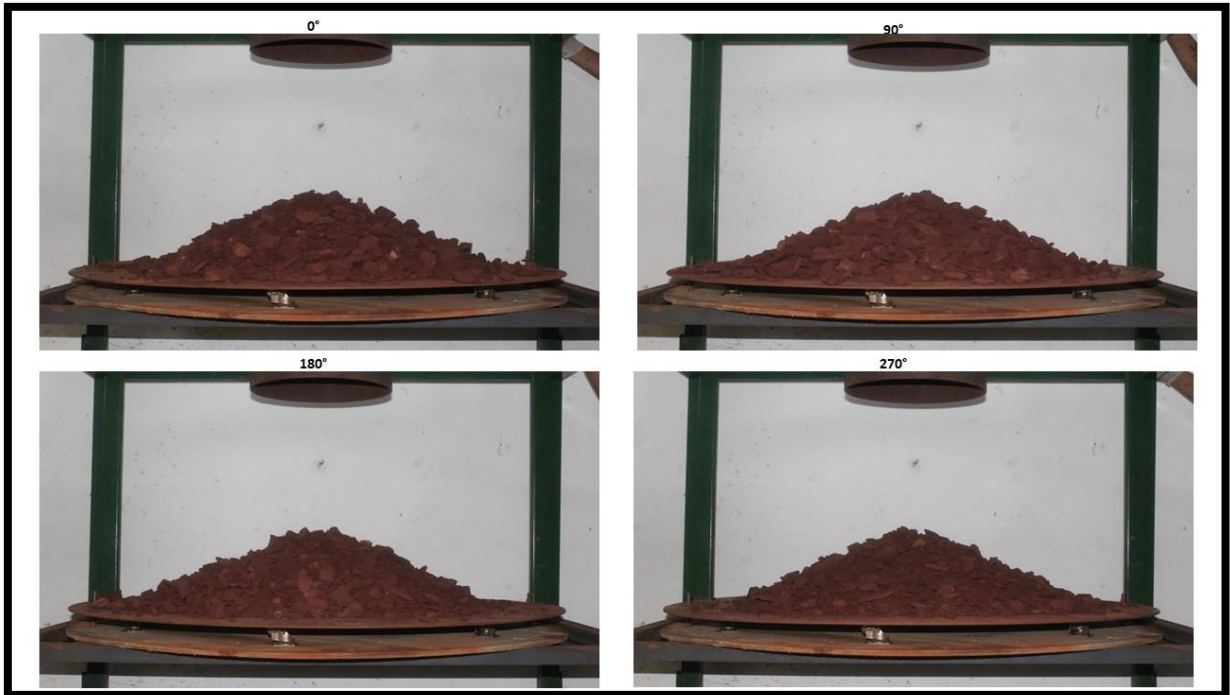
MINERIO - Umidade 1,8%



Ensaio 1. Minério a 1,8%.

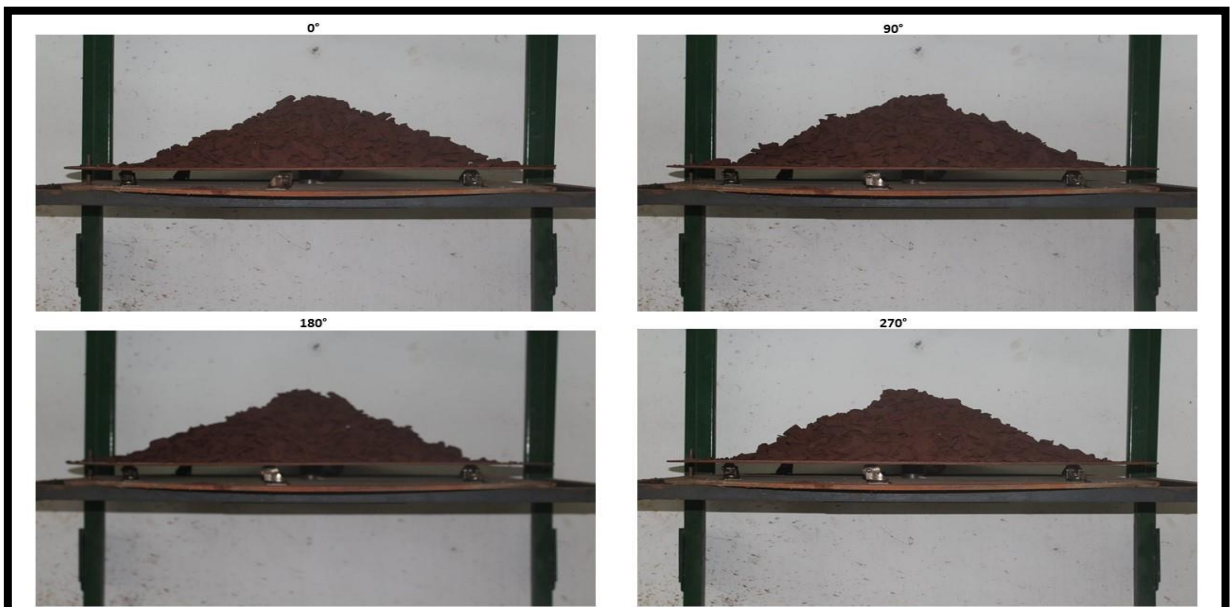


Ensaio 2. Minério a 1,8%.

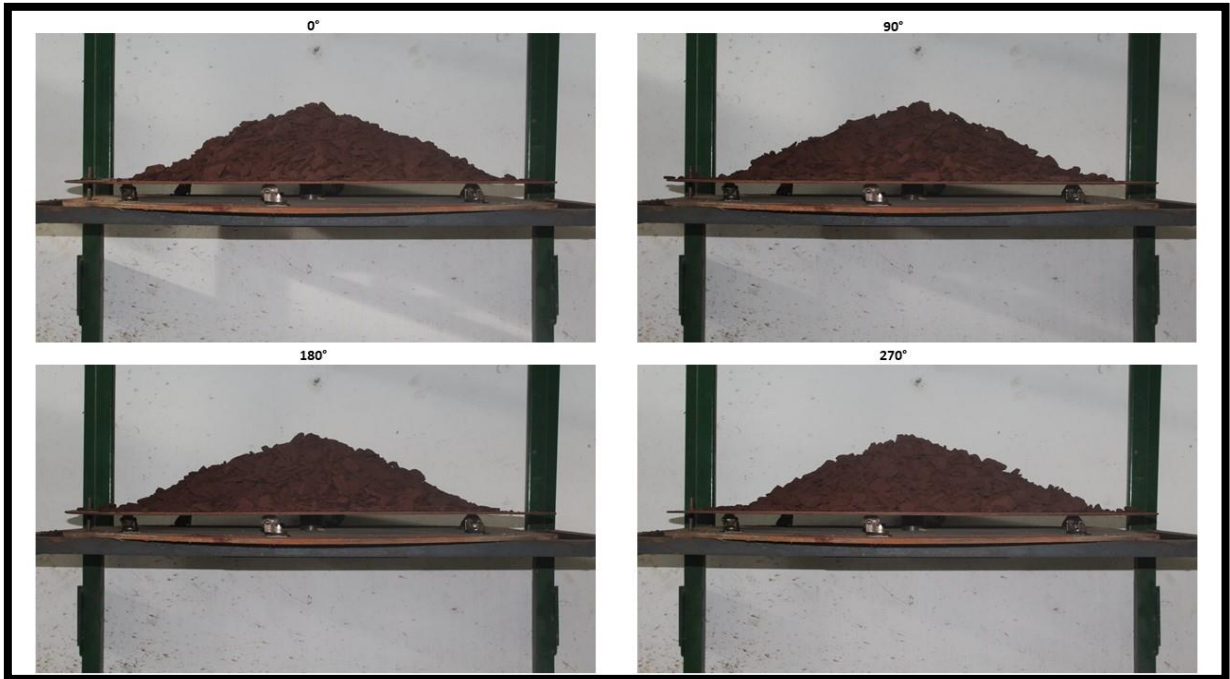


Ensaio 3. Minério a 1,8%.

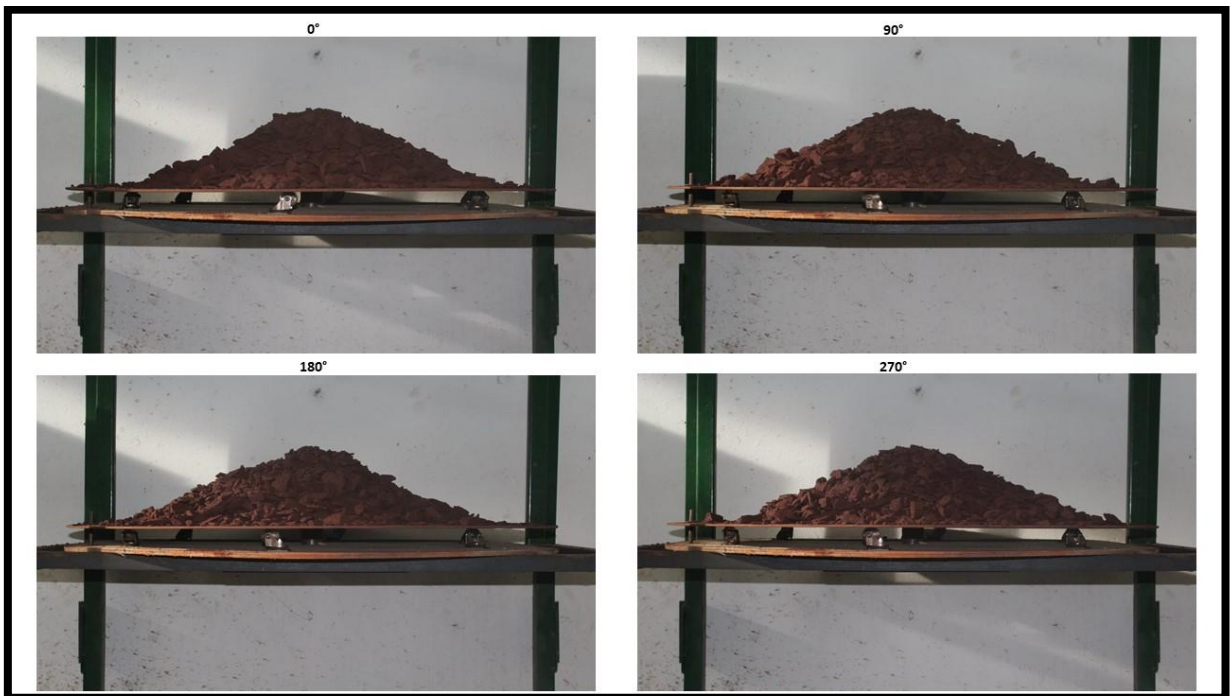
MINERIO - Umidade 3,2%



Ensaio 1. Minério a 3,2%.

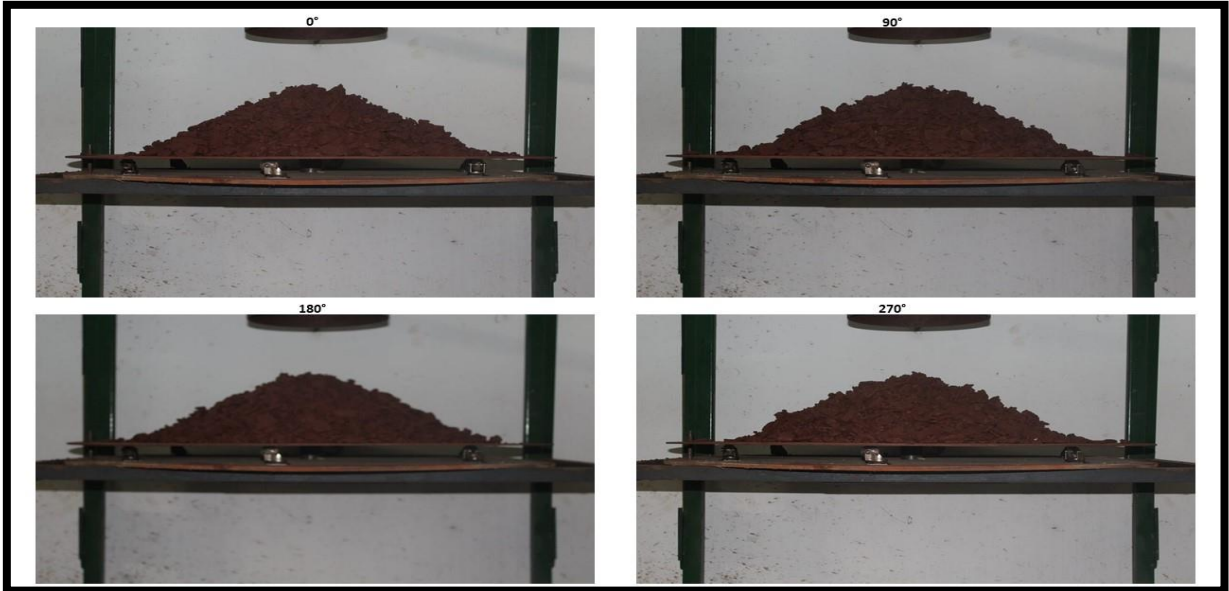


Ensaio 2. Minério a 3,2%.

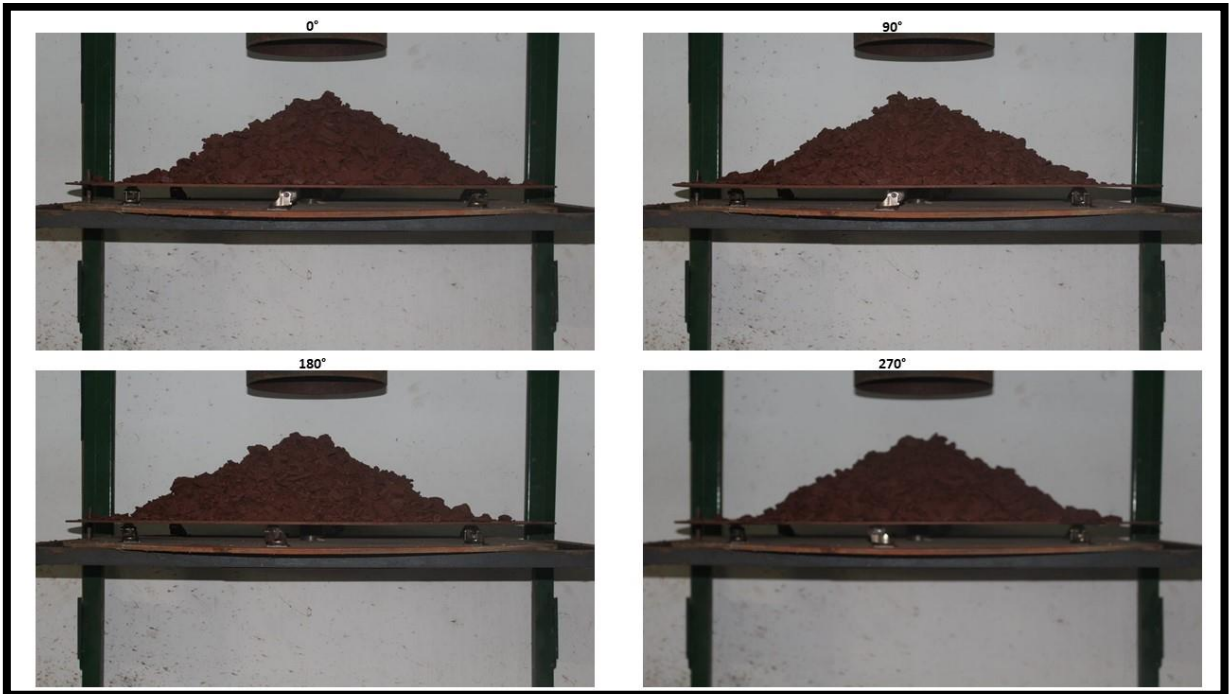


Ensaio 3. Minério a 3,2%.

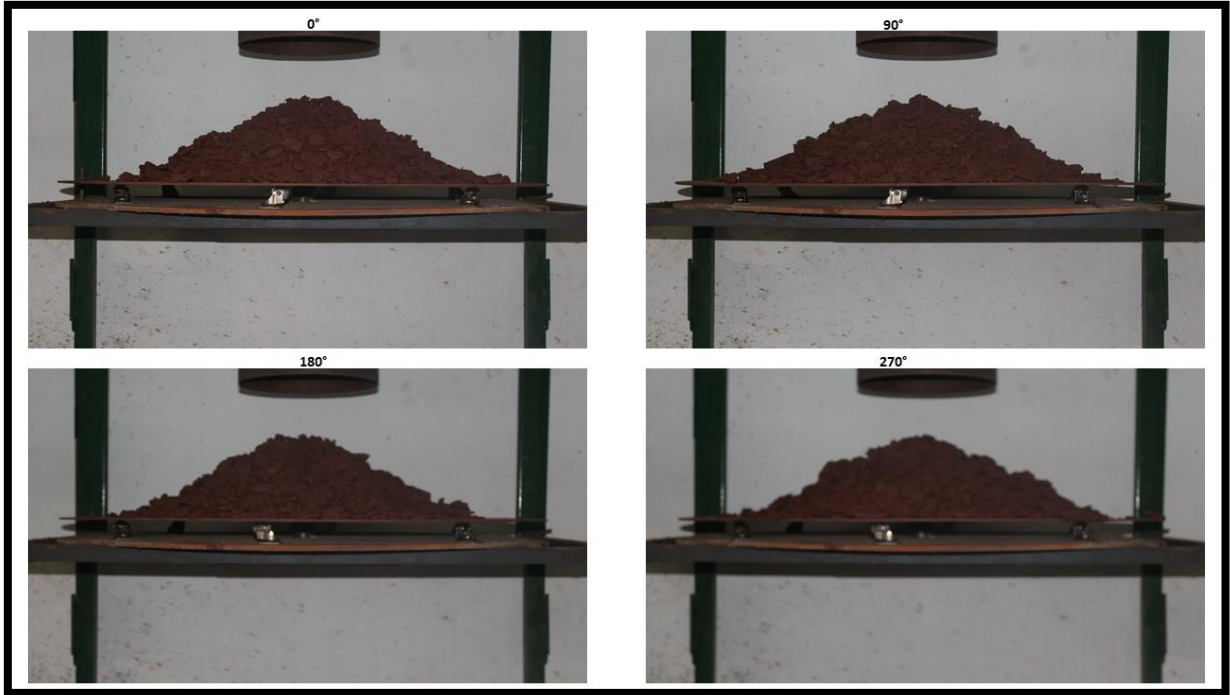
MINERIO - Umidade 4,6%



Ensaio 1. Minério a 4,6%.

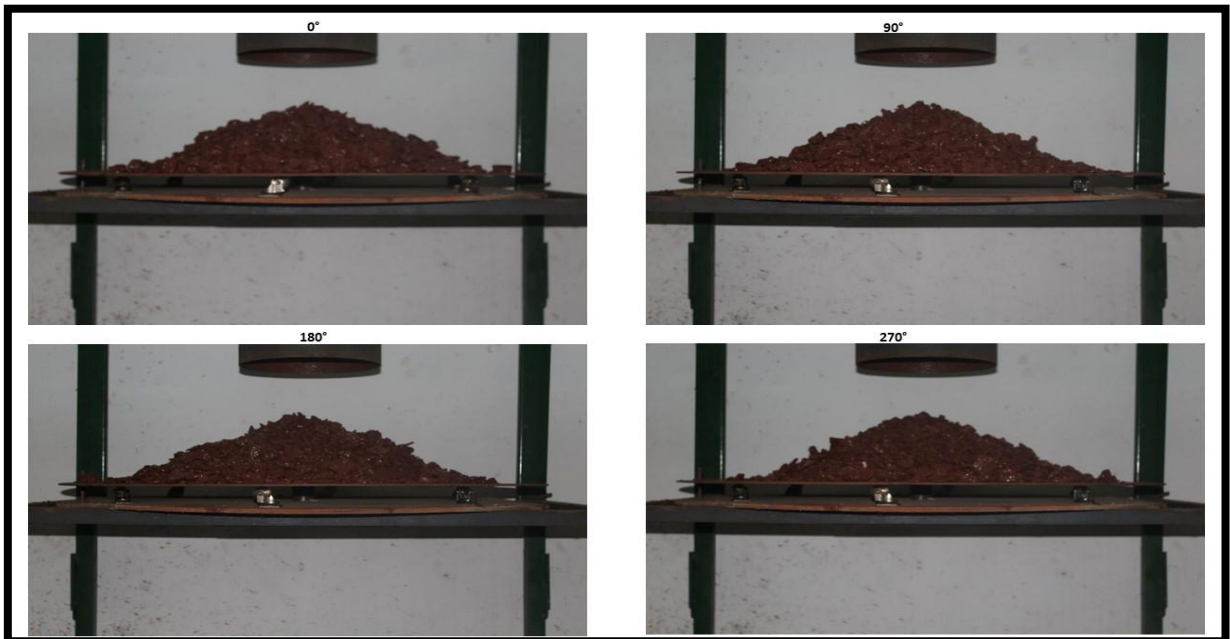


Ensaio 2. Minério a 4,6%.

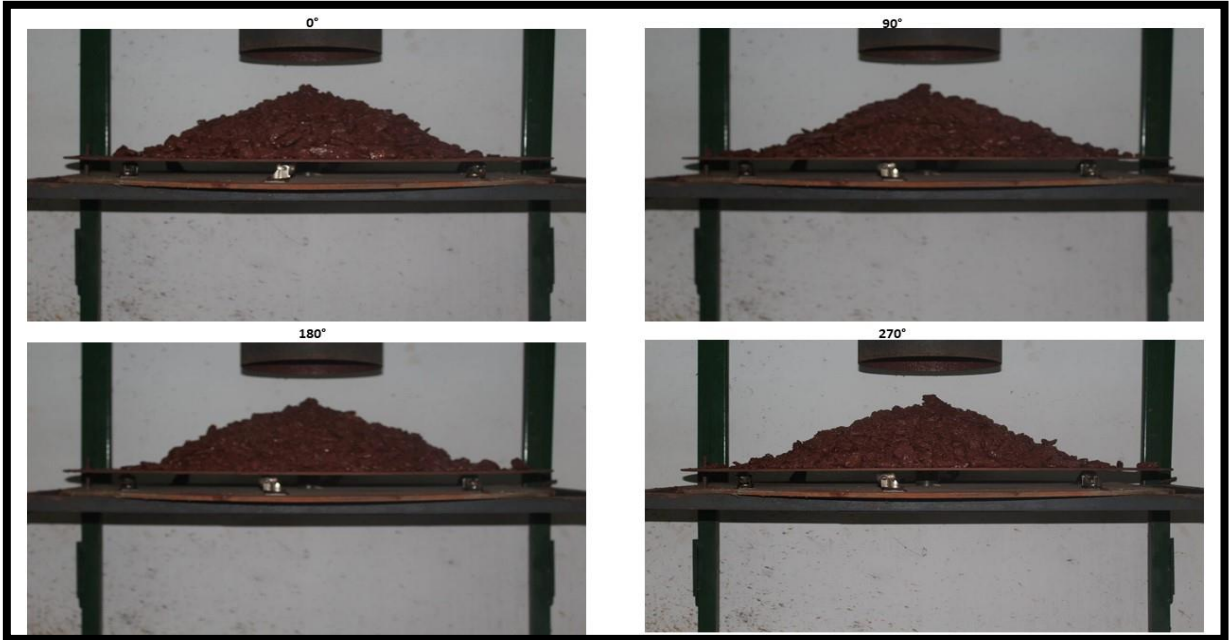


Ensaio 3. Minério a 4,6%.

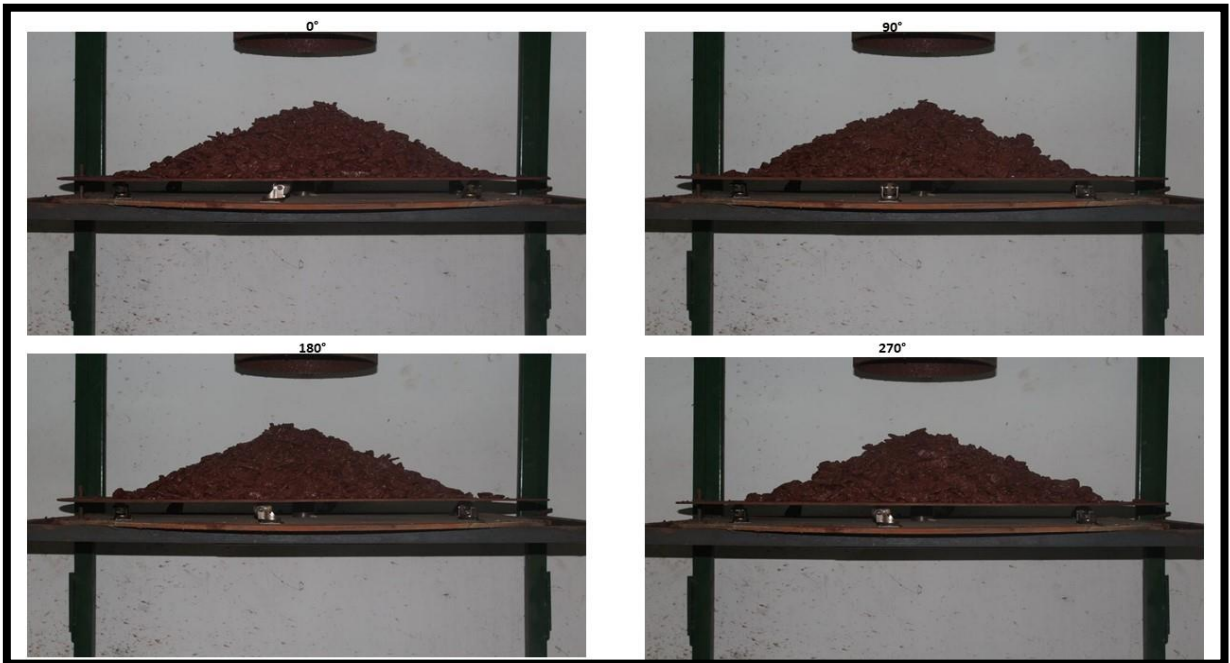
MINERIO - Umidade 6,0%



Ensaio 1. Minério a 6,0%.

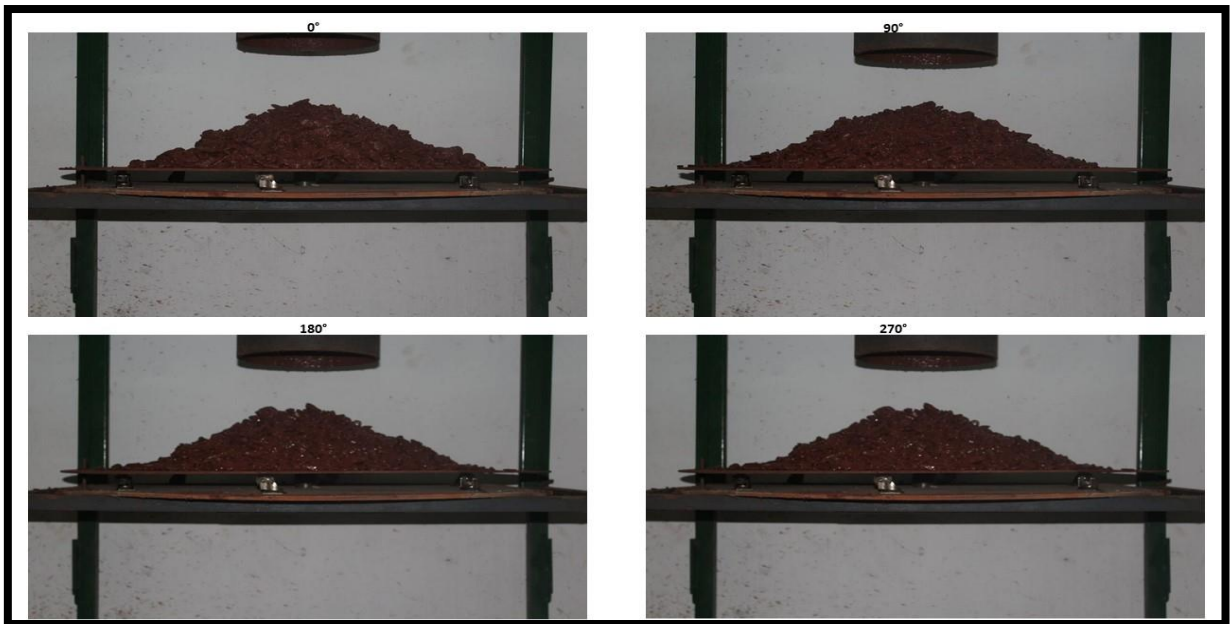


Ensaio 2. Minério a 6,0%.

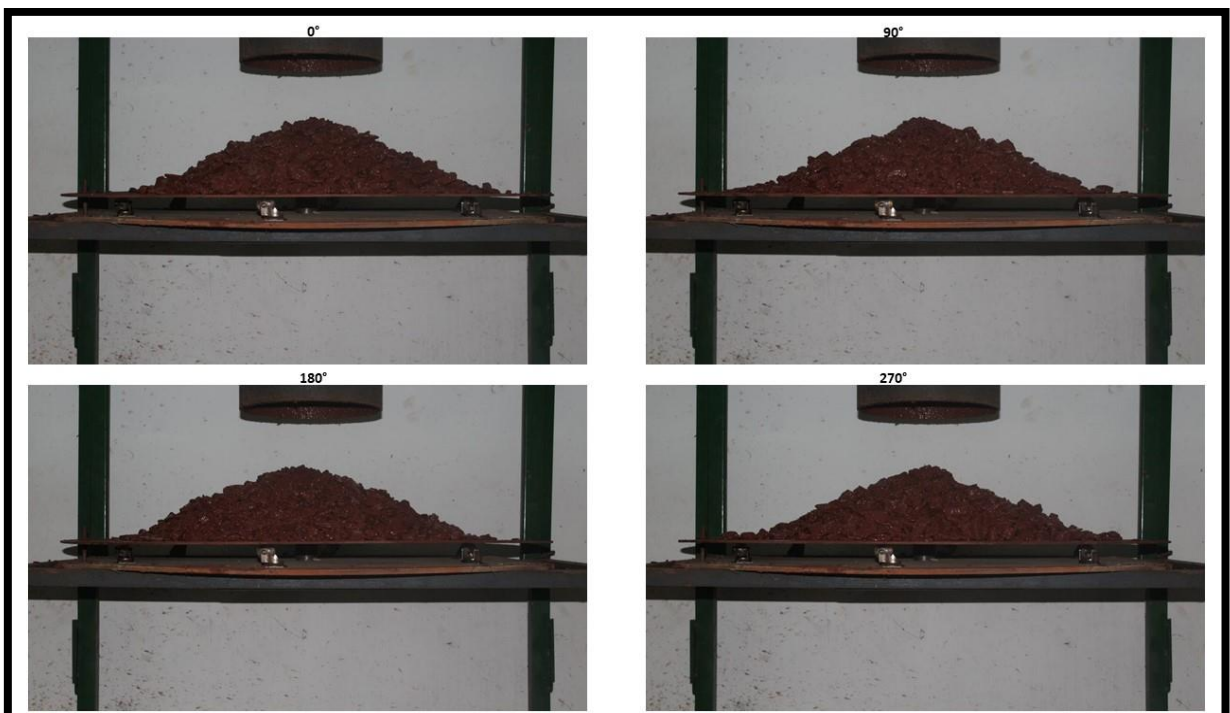


Ensaio 3. Minério a 6,0%.

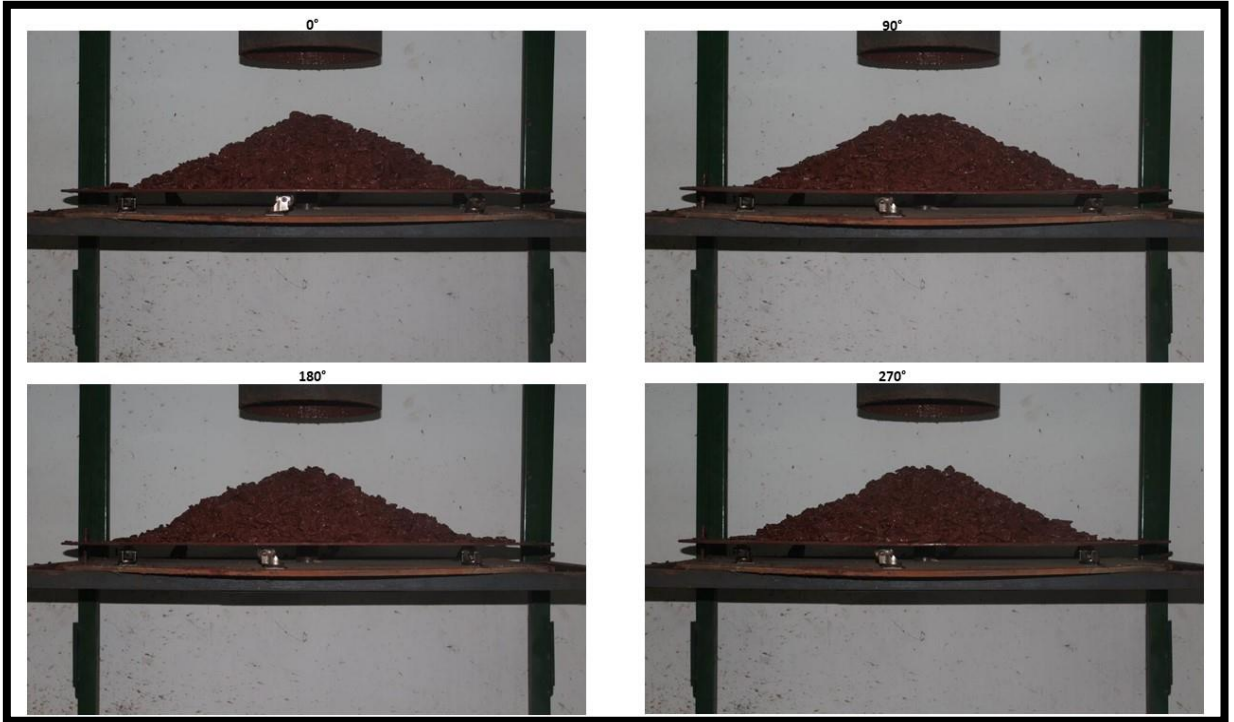
MINERIO - Umidade 7,3%



Ensaio 1. Minério a 7,3%.



Ensaio 2. Minério a 7,3%.



Ensaio 3. Minério a 7,3%.